

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Měření mechanických vlastností svarového spoje
oceli P92

Measurement of Mechanical Properties of P92
Welded Joint

Student: Bc. Adam Vojtas
Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Vojtas**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Měření mechanických vlastností svarového spoje oceli P92**
Measurement of Mechanical Properties of P92 Welded Joint

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii týkající se moderních žárovevých ocelí pro USC bloky tepelných elektráren
2. Shrňte dostupné informace z vývoje 9-12% Cr modifikovaných ocelí
3. Popište metodu svařování 141 a 111
4. Proveďte zkušební svarové spoje na deskách o tloušťce 18 mm metodou 141 + 111
5. Proveďte destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů
6. Srovnajte dosažené výsledky s výsledky dostupnými v literatuře
7. Vyhodnoťte dosažené výsledky provedených zkoušek a vyslovte závěry

Seznam doporučené odborné literatury:

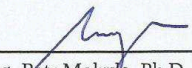
Kolektiv autorů: *Materiály a jejich svařitelnost*. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů, ZEROSS Ostrava, leden 2001
Kolektiv autorů: *Technologie svařování a zařízení*. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*. skripta VŠB – TUO, Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0870-6
VODÁREK, V. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)% Cr ocelí*, monografie VŠB – TUO, Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0329-1
Odborné články z konferencí METAL, CREEP, COST, LIEGE Conference, aj.

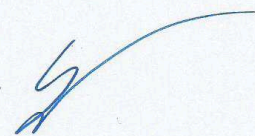
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013
Datum odevzdání: 19.05.2014



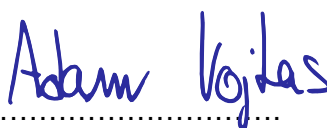

Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2014

A handwritten signature in blue ink, reading "Adam Vojtas". The signature is written in a cursive style. Below the signature is a dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákonů o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledky její obhajoby.

V Ostravě 16.5.2014



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adam Vojtas

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Gen. Janouška 1, Ostrava, 702 00

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Mohylovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a také mé manželce a celé rodině za podporu a trpělivost.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VOJTAS, A. *Měření mechanických vlastností svarového spoje oceli P92: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 66 s.

Vedoucí práce: Mohyla, P.

Cílem této diplomové práce je zpracovat studii o moderních žárovevných ocelích používaných v energetice, s důrazem na ocel P92. Dále jsou popsány metody svařování 141 a 111. V experimentální části této práce byly provedeny zkušební svary na deskách z žárupevné oceli P92 s následným tepelným zpracováním o různých dobách výdrže. Tyto svarové spoje byly podrobeny potřebným destruktivním a nedestruktivním zkouškám. Následuje jejich vyhodnocení a srovnání s již dosaženými výsledky a diskuze výsledků.

ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

VOJTAS, A. *Measurement of Mechanical Properties of P92 Welded Joint: Master's Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2014, 66 p.

Thesis head: Mohyla, P.

The aim of this Master's thesis is to research modern heat resisting steels used in energetics with an emphasis on steel P92. Welding methods 141 and 111 are described. In the experimental part of this thesis test weld joints were produced on plates made of heat resisting steel P92 and a subsequent post weld heat treatment for different times. The weld joints were destructively and non-destructively tested. The Master's thesis is completed with an evaluation and a comparison with previous results.

Obsah

ÚVOD	10
1. Použití moderních žárovevých ocelí pro USC bloky tepelných elektráren	11
1.1. Použitelnost různých materiálů v závislosti na teplotě a tlaku.....	12
1.2. Rozdělení materiálů výhřevných ploch v typickém HRSG kotli.....	13
1.3. Další vývoj materiálů pro USC bloky tepelných elektráren.....	14
2. Přehled vývoje 9-12% Cr modifikovaných ocelí	15
2.1. Ocel X20CrMoV12-1	16
2.2. Ocel P91 (X10CrMoVNb9-1).....	16
2.3. Ocel E911 (X11CrMoWVNb9-1-1)	17
2.4. Ocel VM12-SHC	17
2.5. Ocel P92 (X10CrMoVNb9-2).....	18
2.5.1. Vliv jednotlivých prvků na strukturu oceli P92.....	19
2.5.2. Mechanické vlastnosti oceli P92.....	20
2.5.3. Popis mikrostruktury.....	21
2.5.4. Mikrostruktura oceli po austenitizačním žhání	21
2.5.5. Mikrostruktura oceli po žhání	22
2.5.6. Svařitelnost oceli P92.....	23
2.5.7. Přídavné materiály pro ocel P92	25
3. Popis metod svařování 111 a 141	26
3.1. Metoda 111 – ruční obloukové svařování obalenou elektrodou.....	26
3.1.1. Svařovací zdroje pro metodu 111.....	26
3.1.2. Volba přídavného materiálu pro metodu 111.....	28
3.2. Metoda 141 – svařování metodou WIG (TIG).....	28
3.2.1. Svařovací zdroje pro metodu 141.....	29
3.2.2. Volba přídavného materiálu pro metodu 141.....	29
4. Experimentální část.....	30

4.1.	Popis experimentu	30
4.2.	Chemické složení testovaného materiálu a tepelné zpracování	30
4.3.	Příprava svarových hran	31
4.4.	Označení zkušebních vzorků	32
4.5.	Parametry svařování	33
4.6.	Tepelné zpracování po svařování	34
5.	Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů a jejich vyhodnocení	35
5.1.	Nedestruktivní zkoušky svarových spojů (NDT)	35
5.1.1.	Radiografická metoda	36
5.1.2.	Magnetická prášková metoda	37
5.2.	Destruktivní zkoušky svarových spojů	38
5.2.1.	Zkouška tvrdosti	38
5.2.2.	Příčná zkouška tahem	40
5.2.3.	Zkouška rázem v ohybu	41
5.3.	Metalografické zkoušky svarových spojů	44
5.3.1.	Makrostruktura svarového spoje	44
5.3.2.	Mikrostruktura svarového spoje	46
6.	Srovnání dosažených výsledků s dostupnými výsledky	51
6.1.	Srovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu	51
6.2.	Srovnání průměrných hodnot nárazové práce VWT 0/2	52
6.3.	Srovnání průměrných hodnot nárazové práce VHT 2/2	53
6.4.	Srovnání průměrných hodnot tvrdosti 2 mm pod povrchem	54
6.5.	Srovnání průměrných hodnot tvrdosti v kořenové oblasti	55
7.	Závěr	57
	Seznam použité literatury	59
	Seznam použitých obrázků	63
	Seznam příloh	66

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Veličina	Jednotka
ČSN	Česká státní norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
ISO	Mezinárodní norma	[-]
R_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
R_e	Mez pevnosti v kluzu	MPa
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	MPa
A	Tažnost	%
KV	Nárazová práce	J
M_s	Teplota začátku martenzitické přeměny	°C
M_f	Teplota konce martenzitické přeměny	°C
111	Ruční obloukové svařování	[-]
141	Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu	[-]
A_{C3}	Teplota konce transformace feritu na austenit	°C
α	Železo α - ferit	[-]
γ	Železo γ - austenit	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]

ÚVOD

V dnešní době se stále zvětšuje poptávka po elektrické energii a po lepší účinnosti energetických zařízení. Vylepšení funkce energetických zařízení lze dosáhnout zvýšením teplot a tlaků. Proto jsou vyvíjeny materiály, které jsou schopny tyto podmínky splnit, hlavně co se týče pevnosti v tečení. Materiály musí být zároveň spolehlivé a stálé, mít dobrou tvařitelnost, vysokou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot a v neposlední řadě také dobrou svařitelnost.

Tlak na výrobce hutního materiálu inovovat a vymýšlet nové materiály přispěl k tomu, že za posledních 25 let byly hodnoty meze pevnosti v tečení zvýšeny na dvojnásobek. Za nadkritické parametry můžeme považovat teploty nad 600 °C a tlaky 25 MPa a vyšší.

Skupina moderních žárovevných martenzitických ocelí s obsahem chromu 9-12 % splňuje požadavky použitelnosti pro bloky s nadkritickými parametry. Proto se jimi v mé diplomové práci zabývám nejvíce.

V první části mé diplomové práce přináším stručný přehled používaných materiálů v energetice s důrazem na materiály pro nadkritické parametry. Uvádím také přehled jejich vývoje a směr, jakým se výrobci dále ubírají. Dále jsou popsány metody svařování 111 a 141. V druhé experimentální části se zabývám prováděním svarových spojů na deskách o tloušťce 18 mm, tepelným zpracováním po svařování a měřením mechanických vlastností svarových spojů oceli P92.

Na závěr je provedeno hodnocení dosažených výsledků destruktivních a nedestruktivních zkoušek svarových spojů oceli P92 a jejich srovnání s výsledky již dosaženými z literatury.

1. Použití moderních žárovevých ocelí pro USC bloky tepelných elektráren

Pro neustále se zvyšující spotřebu elektrické energie se vyvíjejí technologie, které zvětší výkon a účinnost její výroby a jsou také ohleduplnější menší produkcí škodlivých emisí. Výrobce a dodavatel turbín respektive celých elektráren do kombinovaného paroplynového cyklu zvýšil za 20 let účinnost o 10%. Toto se děje dosahováním stále vyšších operačních teplot a tlaků. Tímto vzrůstají i nároky na materiály používané na výhrevných plochách, komorách a celého systému potrubí přehříváků. [1]



Obr. 1. Vývoj účinnosti elektráren Siemens v kombinovaném cyklu [1]

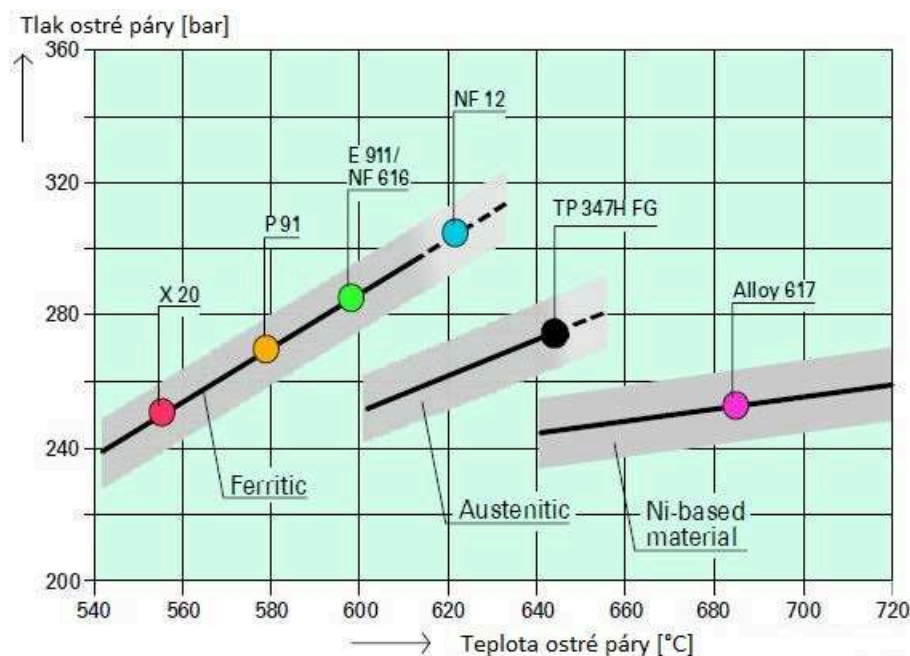
Ve firmě, ve které už mnoho let pracuji jako konstruktér, jsme se podíleli na vývoji a vypracování výrobní dokumentace pro projekt Irsching 4 (první elektrárna v kombinovaném cyklu s prokázanou účinností nad 60%). Pokud bude zvyšování účinnosti stále pokračovat, musí výrobci materiálu potrubí, přídatných materiálů ve spolupráci se svářečskými inženýry hledat další možnosti zvýšení odolnosti svarových spojů.

1.1. Použitelnost různých materiálů v závislosti na teplotě a tlaku

Na přelomu nového tisíciletí byly pro teploty do přibližně 550 °C výhřevné plochy konstruovány z feritických nebo martenzitických materiálů. Nad teplotu 600 °C bylo nezbytné používat austenitické materiály, které mají použitelnost až do 650 °C. Naproti tomu odolnost proti korozi redukuje hranici použití na asi 630 °C. [2]

V prvních kotlech pro velmi vysoké teploty páry byly použity austenitické materiály. Jejich nevýhoda je špatné termo-elastické chování (malá tepelná vodivost, velká tepelná roztažnost). Proto jsou nevhodné pro použití v kotlech, které mají velké změny v provozních výkonech a také pro kotle, kde jsou vyžadovány minimální nájezdové časy.

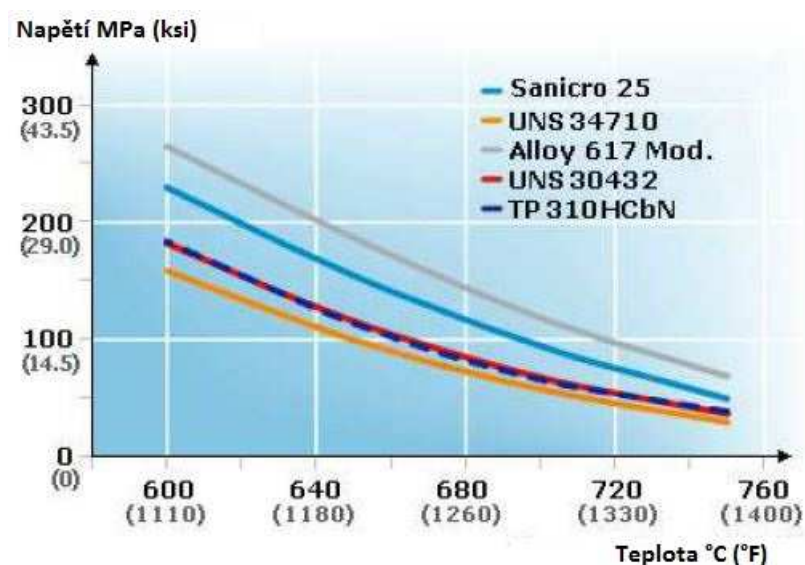
Vývoj chromových ocelí (např. P91, P92, E911) dovolil jejich aplikaci až do teploty 620 °C bez použití austenitických materiálů pro tlustostěnné komponenty. Feritická slitina NF12 dovolí rozšířit použití až do 650 °C. [2] Ve stejných teplotách použití se pohybuje i ocel VM12-SHC. Ta se vyznačuje vyšším obsahem chromu, proto i vyšší odolnosti proti oxidaci. [3] Tato ocel byla využita pro první modul s vysokoteplotním vysokotlakým přehřívákem a dohřívákem pro projekt Irsching 4. [4]



Obr. 2. Použitelnost materiálů v závislosti na teplotě a tlaku [2]

Někteří výrobci vyvíjejí nové vysoce legované austenitické oceli, např. Sanicro 25. Použití je pro trubky přehříváků dovolující teploty až do 700 °C. Dobrá je i creepová pevnost, která téměř dosahuje 100 MPa při 700 °C. [5]

Pro operační teploty kolem 700 °C lze použít niklové slitiny. Slitina DMV 617 mod. má obsahy Cr 22 % a Ni min 45 %. Má vysokou odolnost proti oxidaci, nauhličení, vyšší pevnost v creepu než předcházející austenitická ocel a dobrou svařitelnost. Předehřev a tepelné zpracování svaru není běžně vyžadováno. [6]

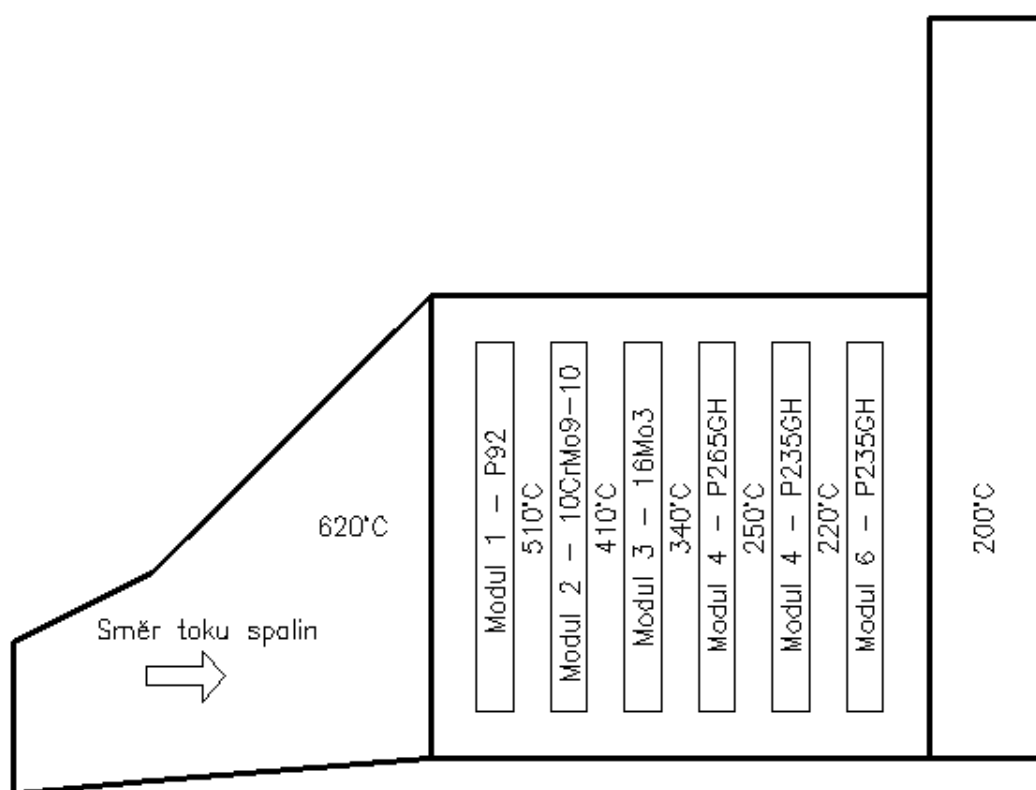


Obr. 3. Porovnání pevnosti v creepu pro Sanicro 25 a DMV 617 [5]

USC (ultra-supercritical) parametry jsou považovány parametry o teplotách v rozmezí 580 – 620 °C a tlaky 27,0 – 28,5 MPa. [7]

1.2. Rozdělení materiálů výhřevných ploch v typickém HRSG kotli

Horizontální parní kotel je rozdělen do několika modulů. Pro každý z modulů je většinou navržen podle teploty a tlaku jiný materiál trubek výhřevných ploch, propojovacích trubek, přívodních a odvodních potrubí. Do horizontálního kotle vstupují spaliny z plynové turbíny o teplotě kolem 650 °C. Teploty nad 600 °C a tlaky 25 MPa a vyšší se považují na nadkritické. S tím jak se teplo předává v každém modulu páře či vodě, klesá i teplota spalin. Klesá tímto i výpočtová teplota, na kterou musí být jednotlivé výhřevné plochy pevnostně navrženy (viz. schéma níže).



Obr. 4. Příklad použití materiálů v kotli pro různé teploty

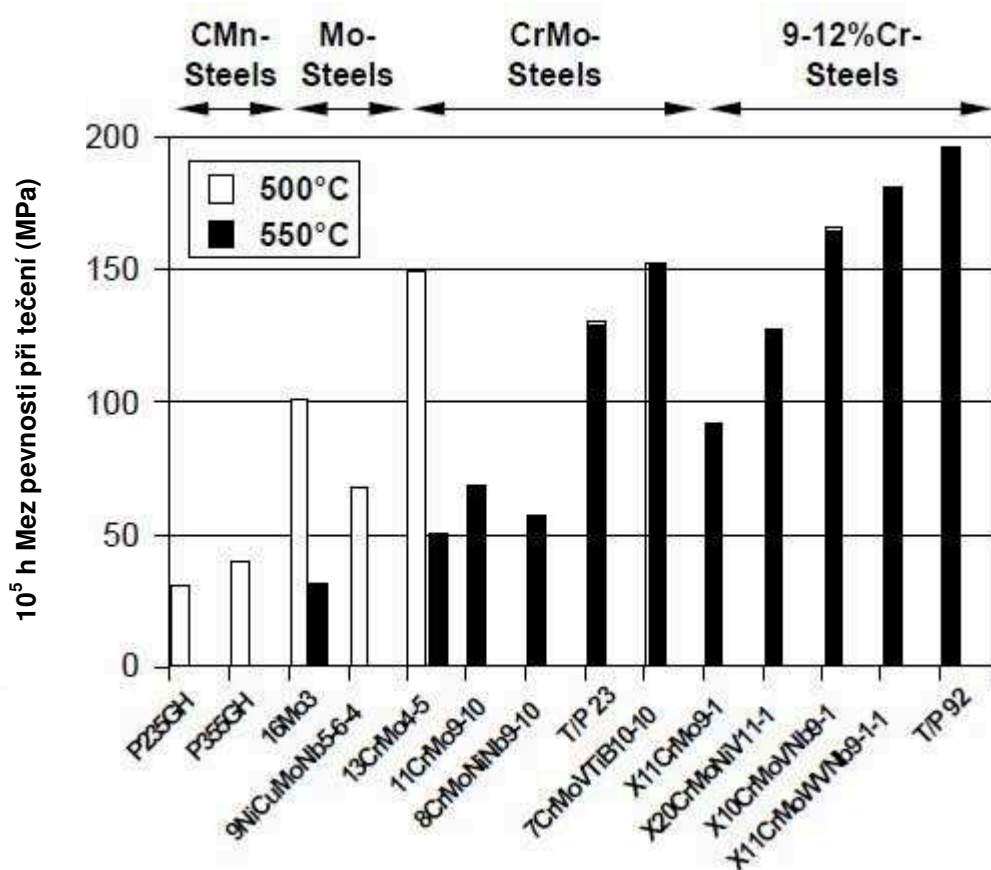
1.3. Další vývoj materiálů pro USC bloky tepelných elektráren

Velcí producenti a vývojáři tepelných elektráren vidí budoucnost ve snižování emisí a zvyšování účinnosti. V Japonsku pracují na projektu tepelné elektrárny pro teplotu 700 °C a účinnost dosahující 46%. Jelikož feritické a austenitické materiály nejsou použitelné pro tyto teploty, aplikace slitin s niklem nebo slitiny Fe+Ni dostatečně vyhoví vysokým dovoleným napětím jako hlavní materiál USC kotlů a turbín. Materiály jako např. Alloy617, CCA617, Haynes230, Alloy 740, Nimonic263 a HR6W jsou v současné době testovány. Testování zahrnuje hodnocení creepových ukazatelů, tepelné únavy, charakteristiky dlouhého používání při vysokých teplotách pro vyšší spolehlivost. Od té doby co jsou používány nákladné slitiny na bázi Ni, je důležité minimalizovat rozsah jejich aplikace optimalizací metod návrhů, která zajistí ekonomickou efektivnost použití těchto materiálů. [8]

2. Přehled vývoje 9-12% Cr modifikovaných ocelí

Požadavky na vývoj nových ocelí použitelných v energetice přicházely s tím, jak se zvyšovaly maximální parametry páry v navrhovaných zařízeních. Zároveň tyto materiály musely dosahovat uspokojivých výsledků pevnosti při creepu, dobrou tvařitelnost, odolnost proti oxidaci za vysokých teplot a také dobrou svařitelnost.

Jedna z prvních žárupevných ocelí o složení 9%Cr-1%Mo byla vyvinuta v roce 1936 při zkoumání materiálů vhodných pro použití v korozních prostředích. Později byly zkoumány chromové oceli s dalšími přidanými prvky. [9] Vliv chemického složení a výsledná struktura oceli se zjišťuje pomocí ekvivalentních obsahů chromu a niklu, pomocí tzv. Schaefflerova diagramu. Případně se dají použít další diagramy (De Longův, WRC) zohledňující ostatní prvky obsažené v oceli, které dále zpřesňují výslednou strukturu oceli.

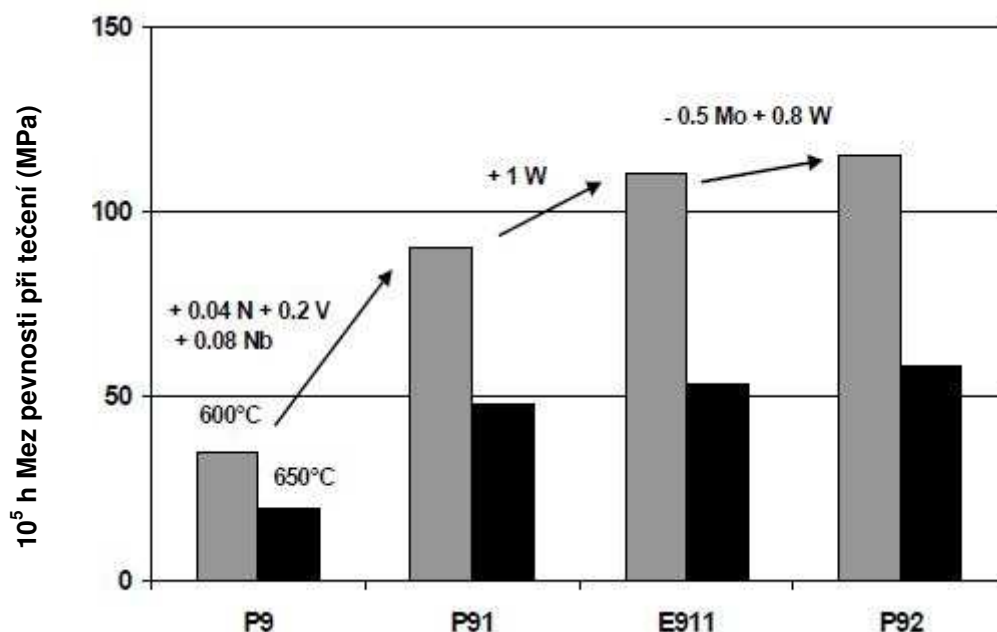


Obr. 5. Rozdělení žárupevných materiálů podle pevnosti v tečení [10]

2.1. Ocel X20CrMoV12-1

Tato ocel byla hojně používána v osmdesátých letech jako materiál pro parovody u kotlů se zvýšenými parametry páry. Teplota pro použití této oceli byla 560 °C, tlak 25 MPa. Objevovaly se ale problémy s nedostatečnou pevností v tečení, v případech špatně zvoleného tepelného zpracování. Při zkouškách nebylo potvrzeno, že při dlouhodobé tepelné expozici významně degraduje mikrostruktura oceli. [9]

Proto se přidávaly další legující prvky, které měly vylepšit hlavně creepové vlastnosti oceli.



Obr. 6. Vývoj 9 % chromových ocelí [11]

2.2. Ocel P91 (X10CrMoVNb9-1)

Tato ocel s přidavkem niobu, vanadu a dusíku zvýšila hodnotu pevnosti v creepu na téměř dvojnásobek. Karbidická fáze $M_{23}C_6$ zpomaluje růst zrn, sekundární MX fáze drží dislokace uvnitř zrn. [9] Ocel má oblast použití do teploty 600 °C a tlaků 30 MPa. Ocel má dobrou svařitelnost, tvařitelnost za tepla, slévarenské vlastnosti a odolnost proti oxidaci v páře.

Při svařování je třeba aplikovat přehřev 200 – 300 °C a co nejvíce omezit vniknutí vodíku do svarového kovu při svařování, tzn. dodržení čistoty při svařování, vysoušení elektrod, základního materiálu, apod. Další z prvků, který významně ovlivňuje kvalitu

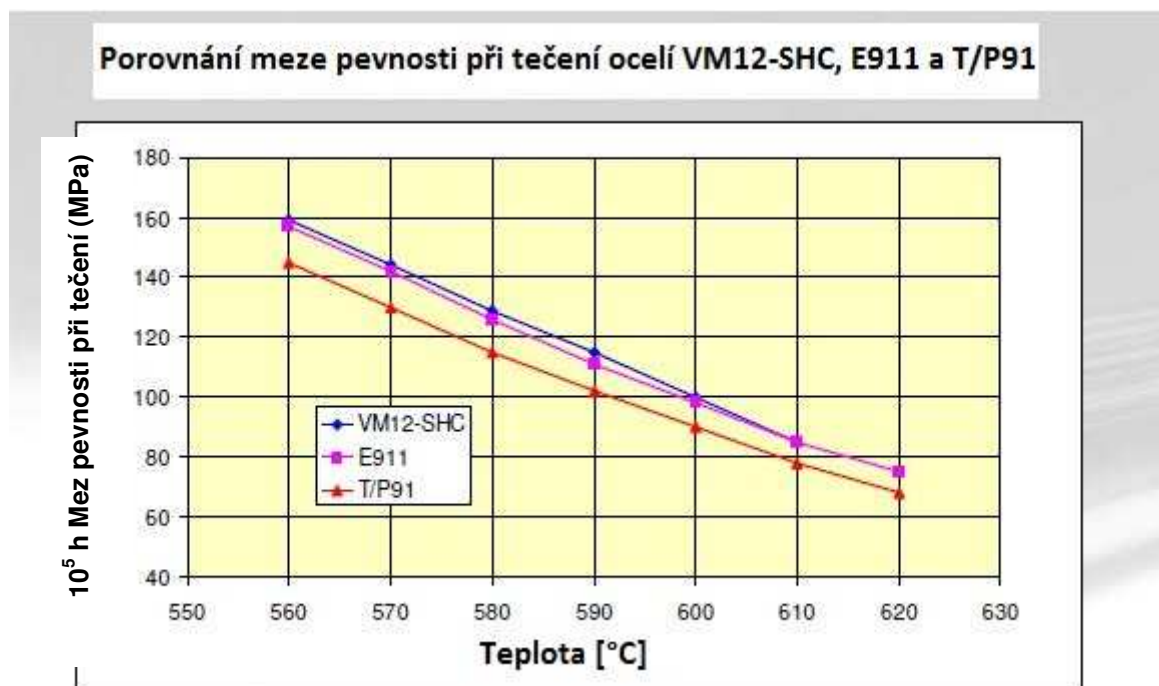
svarového spoje, je dusík. Vznikající nitridy železa zvyšují mez kluzu, pevnost a tvrdost. Stárnutí oceli je nebezpečné hlavně v okolí svaru. Karbonitridy a nitridy vanadu zvyšují pevnost oceli při vysokých teplotách a také v oblasti tečení [12]

2.3. Ocel E911 (X11CrMoWVNb9-1-1)

Tato ocel byla vyvinuta přidáním 1 % wolframu s úmyslem zvýšení únavové pevnosti. Výsledky krátkodobých zkoušek potvrzovaly tuto predikci, při analýze pevnosti při tečení v nízkonapěťové oblasti se toto nepotvrdilo. Vlastnosti této oceli jsou velice podobné předchozí oceli, tzn. nebylo prokázáno zvýšení dlouhodobé meze pevnosti při tečení. [9]

2.4. Ocel VM12-SHC

Snahy o zlepšení pevnosti v tečení a nalezení materiálu, který by dovoloval použití při teplotách do 650°C vedly firmu Vallourec & Mannesmann k vyvinutí této oceli, která má vyšší obsah chromu (11 - 12%). Tvoří se vyšší obsah feritu ve struktuře. Proto je ocel legována kobaltem, kvůli vyvážení tvorby austenitu ve struktuře. Tímto se dosahuje vyšší odolnost proti oxidaci a žáruvzdornost. Při svařování je doporučován nízký přísun tepla do svarového spoje a správná volba průměru elektrody. Tepelné zpracování po svařování je doporučeno nad teplotou 770 °C. [13]



Obr. 7. Porovnání pevnosti v tečení pro oceli VM12-SHC, E911 a P91 [14]

2.5. Ocel P92 (X10CrMoVNb9-2)

Tato ocel pro moderní elektrárenské jednotky byla vyvinuta v Japonsku v roce 1990 jako NF616 (9CrMoWVNbNB). V USA byla dříve vyvinuta ocel P91 (9CrMoVNbN), která je základním představitelem 9% Cr žárovevých ocelí. V porovnání s ocelí P91 obsahuje ocel P92 wolfram (do 2 %), méně molybdenu (do 0,6 %) a také malé množství bóru. Ocel P92 dosahuje taky o 30 % vyšší creepovou pevnost při 600 °C než ocel P91. [9]

Oproti ocelím P91 a E911 obsahuje jenom malé množství dusíku z důvodu potlačení vazby bóru na dusík. Strukturu také ovlivňuje malá rychlost hrubnutí částic $M_{23}C_6$. [9]

Svařitelnost a volba přídavného materiálu pro tento martenzitický materiál závisí na chemickém složení přídavného materiálu s důrazem na vnesenou teplotu do svarového spoje. Teplota předehřevu se volí mezi 250 – 350 °C. Po svařování je doporučeno tepelné zpracování na teplotě 760 °C. Tvrdost svarového kovu se sníží. Čas výdrže na teplotě závisí na tloušťce materiálu a metodě svařování. [15]

Tab. 1. Chemické složení oceli P92 (hm %) [16]

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,07 min.	0,3 min.	-	-	-	8,5 min.	0,3 min.
0,13 max.	0,6 max.	0,02 max.	0,01 max.	0,5 max.	9,5 max.	0,6 max.
V	N	Ni	Al	Nb	W	B
0,15 min.	0,03 min.	-	-	0,04 min.	1,5 min.	0,001 min.
0,25 max.	0,07 max.	0,4 max.	0,04 max.	0,09 max.	2 max.	0,006 max.

Ocel pracující při vysokých teplotách ohrožují probíhající mikrosegregační procesy společně s obohacením hranic zrn škodlivými příměsemi. Prvky, které ovlivňují mikrosegregaci a tímto zkřehnutí struktury jsou P, Sn, Sb a As. Prvky, které tyto nežádoucí procesy zesilují, jsou Si a Mn. Snižují také pevnost v creepu. Důležité je dodržovat nízkou úroveň těchto prvků při zpracování surového železa na ocel. Doporučený maximální obsah vměstků je 0,008 %. [17]

2.5.1. Vliv jednotlivých prvků na strukturu oceli P92

Charakteristika vlivu jednotlivých prvků na mikrostrukturu a vlastnosti oceli: [9]

- Uhlík a dusík

Při zvyšujícím se obsahu uhlíku v oceli vzrůstá její žárupevnost, ale zhoršuje se tvařitelnost a svařitelnost. Naopak klesají teploty rozpadu austenitu M_s a M_f . V případě velkých výrobků vytváří toto předpoklady pro stabilizaci významného množství zbytkového austenitu v martenzitické matici. [9]

Pro výrobu trubek a fitinků používaných v energetice se používají oceli s nižším obsahem uhlíku.

Dusík v oceli zvyšuje žárovebné vlastnosti. Při překročení meze 0,07 % už začíná degradace žárovebných vlastností oceli. Dusík je velmi austenitotvorný prvek.

- Molybden a wolfram

Používají se jako prvky, které zvyšují zpevnění tuhého roztoku. Atomy molybdenu a wolframu mají výrazně větší poloměr než atomy železa. [9]

- Chrom

Základní prvek žárovebných ocelí. Vyšší obsahy chromu zlepšují odolnost oceli proti oxidaci. Naopak negativně působí na rozměrovou stabilitu chromem bohatých karbidů $M_{23}C_6$, které ovlivňují úroveň žárupevnosti. [9]

- Křemík

Pozitivně ovlivňuje odolnost ocelí vůči oxidaci, ale naopak negativně ovlivňuje heterogenitu ingotů. Křemík zvyšuje popouštěcí křehkost. Atomy křemíku jsou menší než atomy železa. Toto vyvolává zpevnění tuhého roztoku. [9]

- Hliník

Má negativní vliv na žárupevnost modifikovaných 9–12% Cr ocelí. Hlavně ve spojení s přísadou dusíku tvoří precipitáty AlN , které se vyskytují na hranicích zrn, případně subzrn. Tyto velké částice nitridu hliníku výrazně snižují creepovou plasticitu. Hliník odčerpává ze struktury dusík, nezbyvá proto dusík na tvorbu VN. [9]

- Vanad a niob

Při legování vanadem dosahují účinného precipitačního zpevnění kovové matrice jemnými částicemi typu MX. To co ovlivňuje intenzitu precipitace částic typu MX je obsah dusíku v oceli, parametry tepelného zpracování a creepová expozice. Přidání malého obsahu niobu hlavně omezuje růst zrna austenitu při dlouhodobé výdrži na vysoké teplotě ohřevu u tepelného zpracování. [9]

- Mangan

Obvykle nízký obsah manganu v oceli, jelikož snižuje transformační teploty a taky negativně ovlivňuje úroveň chemické heterogenity ocelí. Netvoří samostatnou sekundární fázi ve struktuře oceli a je také velice významným dezoxidačním činidlem. [9]

- Bór

Bór v malém množství má velmi pozitivní vliv na žárupevné vlastnosti a na odolnost proti zkřehnutí. Je doporučeno použít maximálně do 100 ppm bóru z důvodu dobré tvařitelnosti a houževnatosti a také svařitelnosti ocelí. [9]

2.5.2. Mechanické vlastnosti oceli P92

Přehled mechanických vlastností oceli P92 dle standardu EN 10216-2+A2.

Tab. 2. Mechanické vlastnosti oceli P92 [16]

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	Tažnost v podélném směru (%)
440	620 - 850	19
Minimální průměrná nárazová práce KV při 20 °C v podélném směru (J)	KV při 20 °C v příčném směru (J)	Tažnost v příčném směru (%)
40	27	17

Původní odhady meze pevnosti při tečení se pohybovaly kolem 190 MPa při 600 °C / 100.000 hodin. Pozdější výsledky z dlouhodobých zkoušek hodnotu upravily na 110 – 120 MPa. [18]

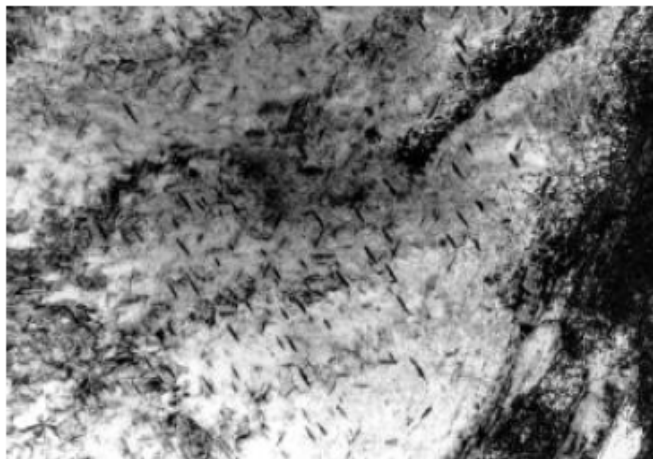
2.5.3. Popis mikrostruktury

Principem žárupevnosti modifikovaných chromových ocelí je precipitace nitridů vanadu. Jsou to jemné a stabilní částice, které brání pohybu dislokací. Tímto zpomalují tečení (creep) materiálu. Dalšími faktory zvyšující žárupevnost oceli je zpevnění tuhého roztoku substitučními prvky Mo a W a také obsah dusíku a bóru. [18]

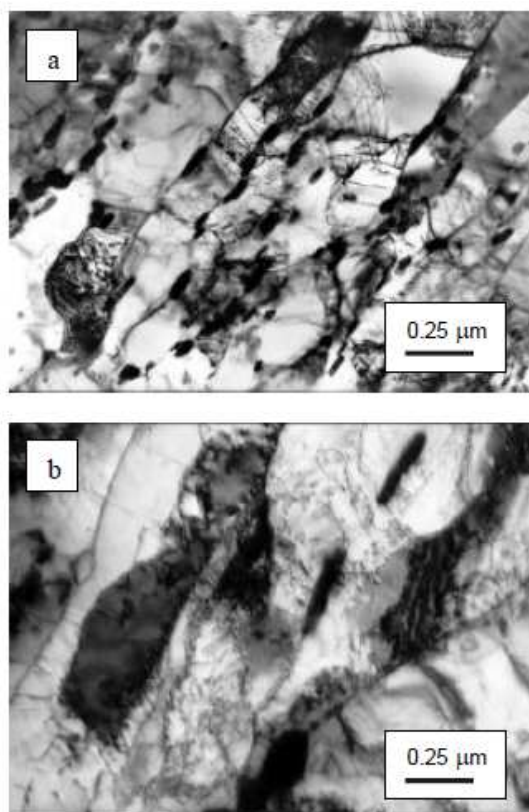
V oceli P92 je po martenzitické transformaci laťkový martenzit. Uvnitř austenitických zrn vznikají rovnoběžné laťky, které jsou od sebe odděleny filmy zbytkového austenitu. I při chlazení na vzduchu vzniká martenzitická struktura z důvodu vysokého obsahu chromu. Při velmi pomalých rychlostech ochlazování vzniká ve struktuře feriticko-karbidická složka v mikrostruktuře. To se projeví výrazným poklesem tvrdosti. Vyskytují se tam částice ϵ -karbidu nebo cementitu. Cementit se při následném popouštění rozpouští. Podle konkrétního složení oceli může ve struktuře vzniknout i malé množství δ -feritu. Ten má velice nepříznivé účinky, snižuje houževnatost a kalitelnost oceli a snižuje její creepové vlastnosti. [18]

2.5.4. Mikrostruktura oceli po austenitizačním žíhání

Austenitizace probíhá okolo teploty 1100 °C, následné popouštění okolo 750 °C. Na následujících obrázcích je znázorněn růst zrn při různé výši austenitizační teploty. Při teplotě 970 °C ještě nebyly všechny složky $M_{23}C_6$ rozpuštěny. Nad teplotou 1070 °C už byly rozpuštěny karbidy a nitridy. Při vyšší austenitizační teplotě dochází k růstu zrna. Vysoký obsah chromu zajistí martenzitickou transformaci i při ochlazování na vzduchu. [11]



Obr. 8. Mikrostruktura oceli P92 (elektr.mikroskop) po austenitizaci 2 h na 970 ° [11]

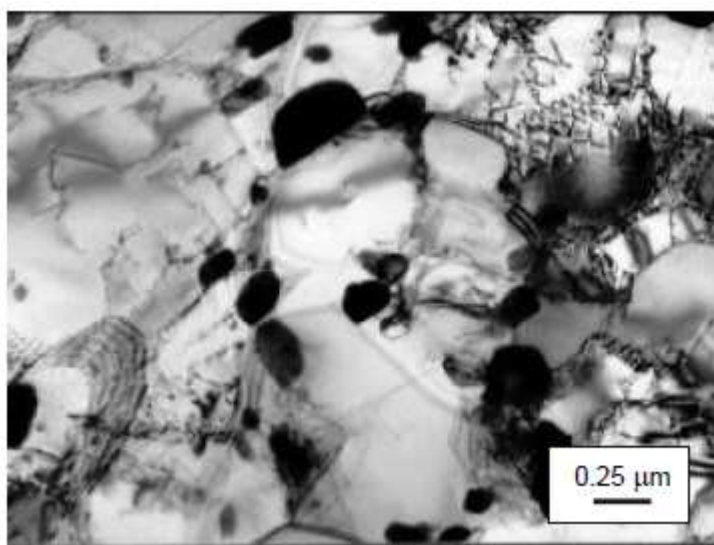


Obr. 9. Mikrostruktura oceli P92 (elektronový mikroskop) po austenitizaci: a) 2 h na 970 °C, b) 2 h na 1145 °C, s následným popouštěním 2 h na 775 °C [11]

2.5.5. Mikrostruktura oceli po žíhání

Při popouštění se konají hlavní dva procesy. Obnovení způsobené snížením vysoké hustoty dislokací po žíhání a zformování sub-zrn a dislokačních sítí. Tyto procesy jsou rychlejší při vyšších teplotách. Druhý proces se týká precipitace karbidů, nitridů a karbonitridů, které byly rozpuštěny při austenitizaci. Při popouštění precipitují na hranicích zrn či sub-zrn. Precipitáty hrají velice důležitou roli v mechanických vlastnostech oceli. [11]

Bylo zjištěno, že hustota dislokací klesá při vyšších teplotách žíhání a po vystavení ocelí namáhání v creepu několika tisíců hodin při 600 °C. Rozměry precipitátů nebyly příliš ovlivněny, ale je zřetelné zvýšení rozměrů precipitátů $M_{23}C_6$ po creepové expozici. [11]

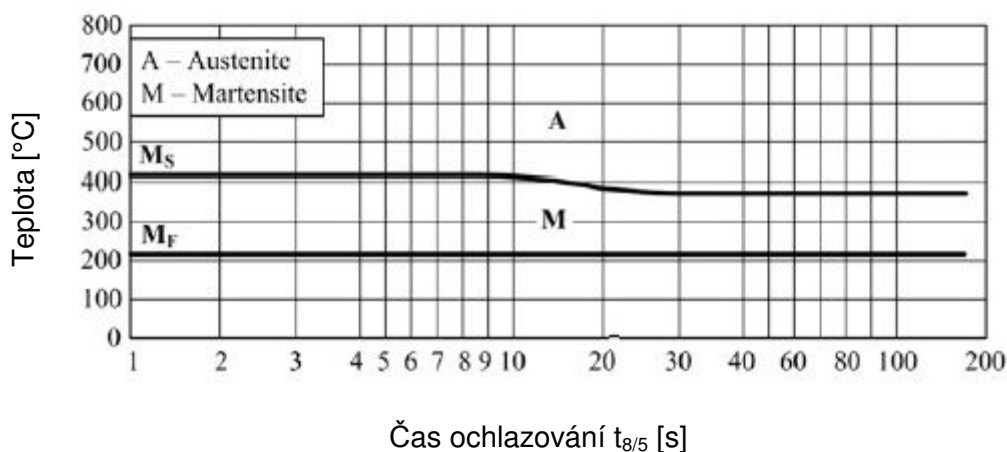


Obr. 10. Mikrostruktura oceli P92 po austenitizaci 2 h na 970 °C a popouštění na 775 °C [11]

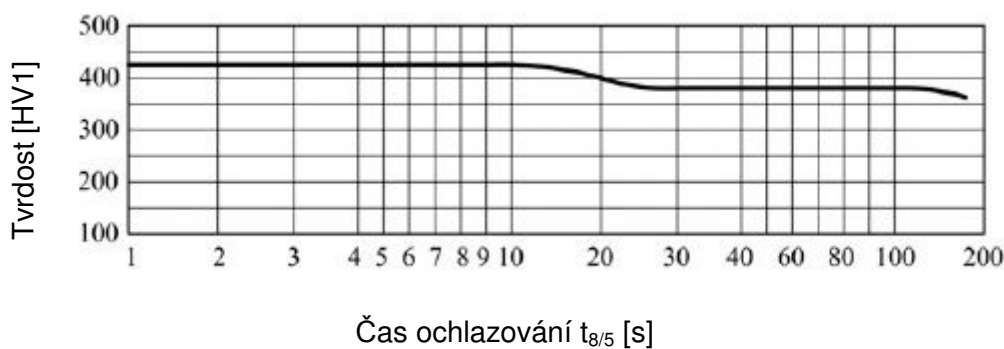
2.5.6. Svařitelnost oceli P92

Martenzitické oceli se svařují v rozsahu martenzitických teplot (pod teplotou M_s), tzn. mezi 200 – 350 °C. Je velice důležité kontrolovat teplotu během svařování a během tepelného zpracování po svařování. Po aplikaci tepelného zpracování a poklesu tvrdosti ve svarovém spoji je docela malý risk vzniku studených trhlin. Je důležité nechat svarový spoj zchladnout pod teplotu M_f z důvodu dokončení martenzitické přeměny v oceli a potom aplikovat tepelné zpracování. Teplota M_f pro přídatné materiály o stejném chemickém složení jako ocel P92 je přibližně 150 °C, tzn. že svarový spoj by měl být ochlazen na nejméně 100 °C. [15]

Dalším opatřením po svařování je odstranění vodíkového praskání. Žíhání by mělo být v rozmezí teplot 250 až 300 °C po dobu asi 2 až 3 hodin, během kterých by měl vodík ze svarového kovu difuzí odejít. Použití tohoto žíhání závisí na technologii svařování a taky na tloušťce materiálu. [15]



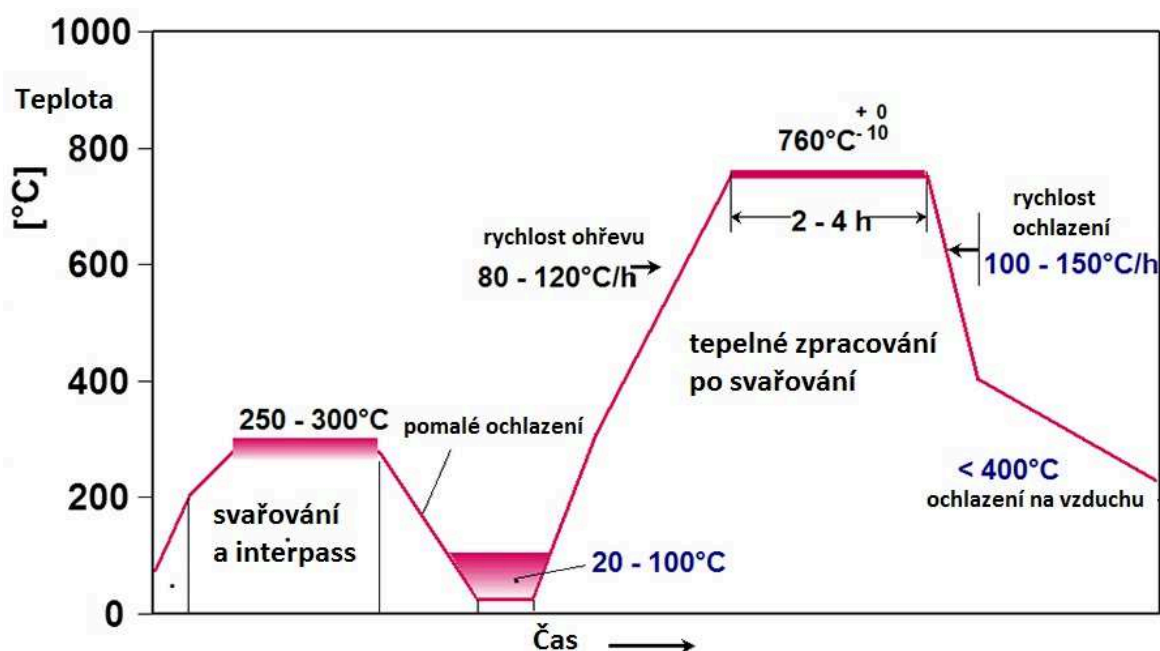
Obr. 11. Závislost času ochlazování na výsledné struktuře [3]



Obr. 12. Závislost výsledné tvrdosti na čase ochlazování [3]

Je vyžadováno použití předehřevu, teplota interpass by měla ležet mezi teplotami M_s a M_f . Tyto oceli jsou citlivé na praskání z důvodu vrubů, proto je důležité omezovat ostré přechody, zápaly a neprůvary. [19]

Po svařování je vyžadováno tepelné zpracování k dosažení optimálních mechanických vlastností. Svarový spoj má po svařování velký obsah martenzitu a tímto velkou tvrdost. Svarový spoj vykazuje také příliš nízké hodnoty nárazové práce. Vhodným tepelným zpracováním docílíme snížení tvrdosti za malé snížení pevnosti a také zvýšení hodnot nárazové práce nad minimální požadovanou úroveň. Tepelné zpracování po svařování musí být provedeno podle přísných podmínek. [20]



Obr. 13. Teplotní cyklus při svařování a při tepelném zpracování oceli P92 [20]

2.5.7. Přídavné materiály pro ocel P92

Přídavné materiály se volí podle stejného chemického složení jako má základní materiál, s odpovídající mezí pevnosti v tahu R_m . Lze použít přídavné materiály, které jsou dolegovány niklem. Svarový kov má potom menší náchylnost ke vzniku trhlin za studena. S ohledem na mez pevnosti je možno použít i austenitické přídavné materiály. [21]

Volba přídavného materiálu probíhá podobně jako pro ocel P91. Zatímco pro ocel P91 je vyžadován obsah manganu a niklu maximálně 1,2 %, u oceli P92 jejich obsah ovlivňuje teplotu A_{c1} , která s rostoucím podílem těchto prvků klesá. Při snižujícím se obsahu manganu a niklu klesá vrubová pevnost v přídavném materiálu. Nízký obsah manganu ovlivňuje pevnost více než nízký obsah niklu. [15]

Tab. 3. Přehled vybraných přídavných materiálů pro ocel P92

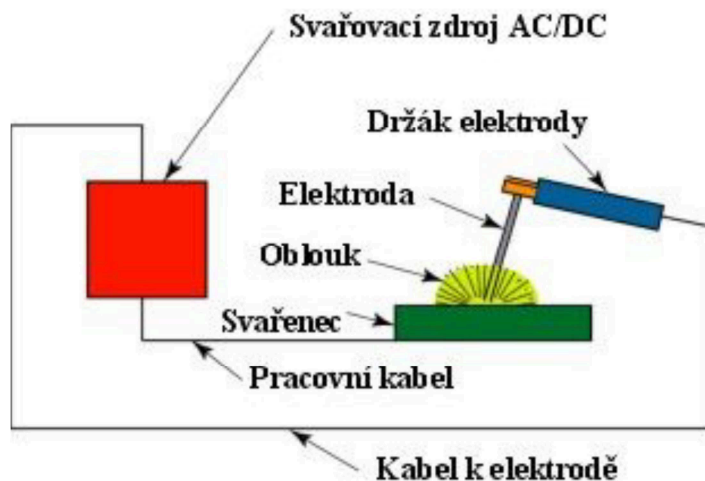
P92	ESAB	OK TIGROD 13.38
	Böhler	Thermanit MTS 616
	Oerlikon	CARBOROD KV7MN

3. Popis metod svařování 111 a 141

Při svařování vzniká nerozebíratelný spoj. Ten je možno vytvořit buď přiblížením atomů na vzdálenost parametru mřížky (tlakové svařování) nebo spojovaným povrchům dodáme takovou aktivační energii, která zvýší amplitudu rozkmitu atomů kovů v mřížce (tlakové za zvýšené teploty) nebo dokonce uvolní atomy kovu z pevných rovnovážných poloh v mřížce (tavné svařování). [22] Existuje mnoho metod svařování, níže uvádím popis metod 111 a 141, jelikož se v praxi využívají nejčastěji.

3.1. Metoda 111 – ruční obloukové svařování obalenou elektrodou

Tato metoda má široké uplatnění ve všech oblastech průmyslové výroby, např. energetika, ocelové konstrukce, mosty, lodě. Elektrický oblouk, jako zdroj tepla, vzniká mezi elektrodou a základním materiálem. Lze svařovat všechny materiály ve všech polohách. Rozsah svařovacích proudů 10 – 2000 A, napětí 10 – 50 V. Teplota elektrického oblouku je kolem 5000 °C. [23]



Obr. 14. Svařování obalenou elektrodou metoda 111 [24]

3.1.1. Svařovací zdroje pro metodu 111

Svařovací zdroj musí splňovat požadavky na správné provedení svaru, mimo jiné schopnost regulace napětí a proudu, statická a dynamická charakteristika a odolnost proti krátkodobým zkratům. [23]

Svařovací zdroje dělíme na:

- zdroje pro výrobu **střídavého** svařovacího proudu (svařovací transformátory)
- zdroje pro výrobu **stejnosměrného** svařovacího proudu (svařovací agregáty, svařovací usměrňovače)

S tím jak se zařízení pro svařování vyvíjí, vznikají různá vylepšení pro optimálnější průběh svařovacího cyklu a k omezení vad svarového spoje. Jednou z nich je např. „hot start“. Při začátku svařování se zvýší svařovací proud na určitý čas. Po jeho skončení se proud zpět sníží. Rychlejší ohřátím základního materiálu se zabraňuje vzniku studených trhlin. [23]

Dalším vylepšením je systém „anti-stick“. Pokud nenastane zapálení elektrického oblouku okamžitě, klesne velikost svařovacího proudu a zamezí se tím lepení elektrody na základní materiál. Také se používá u svařování nelegovaných materiálů v energetice v poloze PG vysoké napětí naprázdno, které usnadňuje zapálení a držení oblouku. [23] Funkce „arc force“ reguluje svařovací proud během svařování, pokud se během svařování mění vzdálenost mezi elektrodou a základním materiálem. Tím se vytváří rovnoměrný svar.



Obr. 15. Svařovací zdroj pro metodu 111 [25]

3.1.2. Volba přídavného materiálu pro metodu 111

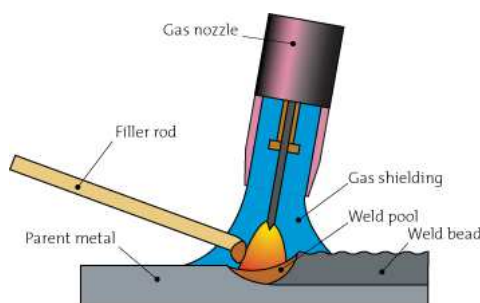
U ručního svařování elektrickým obloukem se používají obalené elektrody. Jejich volba závisí mimo jiné na těchto parametrech:

- a) obsah C a chemické složení základního materiálu
- b) pevnost základního materiálu
- c) poloha svařování
- d) aplikace předehřevu, teplotě interpass

Dle tloušťky základního materiálu, navrženého tvaru a rozměru svaru a polohy svařování se volí průměr elektrody. Podle typu svařovacího zdroje volíme typ obalu elektrody. Nejdůležitějšími parametry svařování jsou velikosti svařovacího proudu, napětí a rychlost svařování. [25]

3.2. Metoda 141 – svařování metodou WIG (TIG)

Jedná se o obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (wolfram-inert-gas, někdy taky tungsten-inert-gas). Moderní metoda svařování železných i neželezných kovů. Oblouk vzniká mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Svarová lázeň musí být chráněna inertním plynem, nejčastěji argonem, heliem nebo jejich směsí. Po natavení svarových ploch se přidává přídavný materiál ve formě drátu. [26] Ruční svařování je náročné na zručnost svářeče. Důležitá je příprava a čistota svarových ploch, typ a průměr wolframových elektrod a jejich správné nabroušení. Ochranný plyn musí mít vysokou čistotu a proudit dostatečně dlouho, aby chránil svarový kov proti oxidaci. U některých citlivých materiálů je vhodné použít sekundární ochranu plynem k zabránění zkřehnutí a oxidaci. [26]



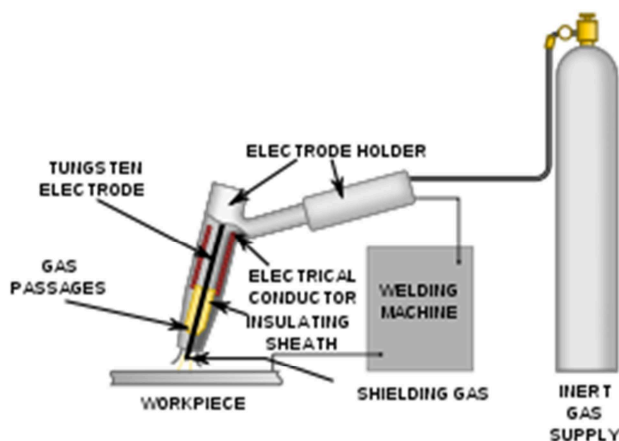
Obr. 16. Svařování metodou 141 [28]

3.2.1. Svařovací zdroje pro metodu 141

Svařovací hořák je velice namáhaný teplem od svařování, proto bývá vybaven vodním chlazením. Zařízení pro svařování rozdělujeme podle druhu svařovacího proudu na:

- svařování stejnosměrným proudem
- svařování střídavým proudem
- svařování impulzním proudem

Svařování impulzním proudem, obzvláště systém dvouimpulsového svařování (Dual pulse) je nejnovější systémem WIG svařování. Mezi jeho výhody patří dokonalejší provedení svaru, lepší mechanické a plastické vlastnosti, snížení tepelného ovlivnění materiálu, široký rozsah regulace svařovacího proudu, apod. Tyto výhody najdou použití pro svařování tenkých plechů, různých tlouštěk a materiálů citlivých na přehřátí. [23]



Obr. 17. Sestava příslušenství pro svařování metodou 141 [28]

3.2.2. Volba přídatného materiálu pro metodu 141

Přídavný materiál se volí podle chemického složení základního materiálu, jeho mechanických vlastností, žádaných výsledných vlastností svarového spoje a podle typu svarového spoje. Hlavní podmínka volby je, že svarový spoj musí mít stejné nebo lepší vlastnosti než základní materiál. Přídavný materiál plní i tyto funkce: leguje svarový kov, nahrazuje prvky, které byly při svařování vypáleny, zlepšuje formování svaru. [26]

4. Experimentální část

4.1. Popis experimentu

Desky o tloušťce 18 mm a rozměrech 125 x 250 mm z materiálu P92 byly svařeny metodou 141 (kořen) a 111 (výplň). Celkem bylo připraveno 5 ks vzorků svarových spojů. Po dokončení svařování byly jednotlivé desky se svarovými spoji tepelně zpracovány a to tak, že čas výdrže pro první vzorek byl jednu hodinu, pro další vzorky tři, čtyři a pět hodin při teplotě 730 °C. Vzorek č. 2 nebyl tepelně zpracován.

Dále následovaly nedestruktivní testy, destruktivní testy mechanických vlastností a metalografická analýza.

Nakonec proběhlo vyhodnocení výsledků a zjištění nejvhodnější doby tepelného zpracování.

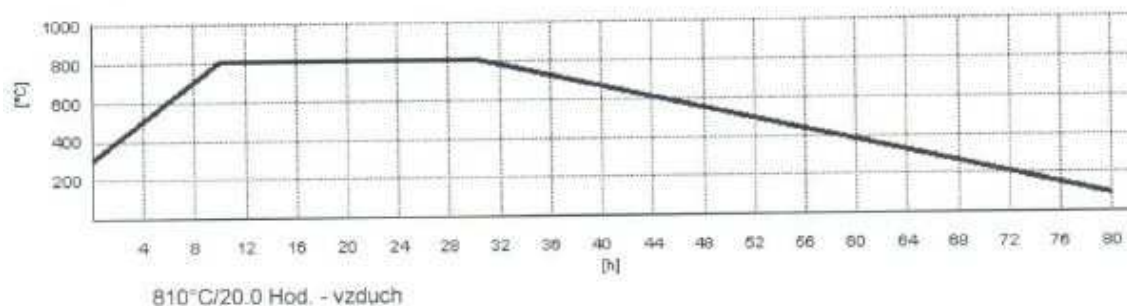
4.2. Chemické složení testovaného materiálu a tepelné zpracování

Dle chemické analýzy provedené ve společnosti Vítkovice Testing Center byly zjištěny tyto hodnoty chemického složení:

Tab. 4. Chemické složení testované oceli P92 dle chemické analýzy (hm %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ti
0,109	0,44	0,016	0,0026	0,30	8,860	0,404	<0,004
V	N	Ni	Al-c	Nb	W	B	
0,191	0,0481	0,288	0,011	0,049	1,690	0,0033	

Číslo tavby: 54380

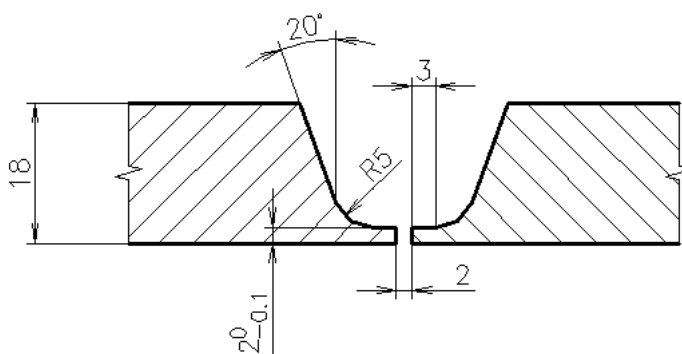
Tepelné zpracování: Žihání na měkko**Obr. 18.** Tepelné zpracování polotovaru - protokol viz. příloha

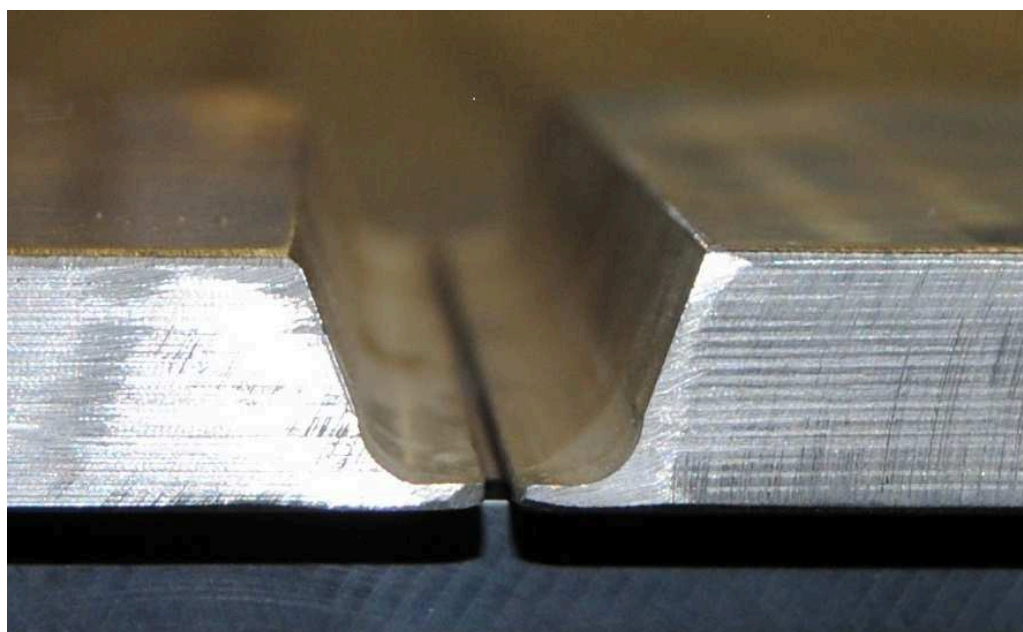
Tepelné zpracování v režimu: 1060 °C/1 hod, náhřev: 150 °C/hod, ochlazování: olej.

Popouštění: 770 °C/1 hod, náhřev: 150 °C/hod do teploty 400 °C – potom volně na vzduchu.

4.3. Příprava svarových hran

Na zkušebních vzorcích byla provedena úprava svarových hran obráběním. Svarové hrany byly očištěny a odmaštěny.

**Obr. 19.** Detail úpravy svarových hran

**Obr. 20.** Úprava svarových hran

4.4. Označení zkušebních vzorků

Každý vzorek (2 desky) byl označen číslem, které bylo na každou desku vyraženo razníky.

Tab. 5. Označení zkušebních vzorků

Číslo vzorku	Tloušťka desky [mm]	Doba výdrže při tepelném zpracování [hod]	Číslo vzorku v záznamu o svařování
1	18	1	1/18
2	18	Bez TZ	2/18
3	18	3	3/18
4	18	4	4/18
5	18	5	5/18

4.5. Parametry svařování

Pro každou metodu svařování (111, 141) byly zvoleny parametry svařování. Metodou 141 byl zavařen kořen svarového spoje. Metodou 111 bylo provedeno vyplnění zbývajících částí svaru. Záznamy o svařování pro každý zkušební svar jsou v příloze.

Teplota předehřevu: 200 °C

Teplota interpass: 200 – 300 °C

Tab. 6. Parametry svařování pro metodu 141

Metoda svařování	141 (kořen)
Typ svarového spoje	U
Poloha svařování	PA
Ochranný plyn	ARCAL TIG-MIG, AirLiquide
Přídavný materiál	Thermanit MTS616, Böhler, ϕ 2,4 mm
Svařovací proud	120 – 150 A
Svařovací napětí	12 – 14 V

Tab. 7. Parametry svařování pro metodu 111

Metoda svařování	111 (výplň)
Typ svarového spoje	U
Poloha svařování	PA
Přídavný materiál	Thermanit MTS616, Böhler, ϕ 2,5 mm Thermanit MTS616, Böhler, ϕ 3,2 mm
Svařovací proud	88 – 90 A pro elektrodu ϕ 2,5 mm 108 – 110 A pro elektrodu ϕ 3,2 mm
Svařovací napětí	22 – 24 V pro elektrodu ϕ 2,5 mm 22 – 24 V pro elektrodu ϕ 3,2 mm

4.6. Tepelné zpracování po svařování

Po dokončení svarového spoje byl vzorek dohříván v peci po dobu dvou hodin při 250 °C. Následovalo vychladnutí na vzduchu v zábalu (Sibral). Po vychlazení na teplotu okolí 20 °C byly vzorky podrobeny tepelnému zpracování při 730 °C.

Tab. 8. Parametry tepelného zpracování

Teplota		730 °C
Čas výdrže	Vzorek č. 1/20	1 hod
	Vzorek č. 2/20	Bez TZ
	Vzorek č. 3/20	3 hod
	Vzorek č. 4/20	4 hod
	Vzorek č. 5/20	5 hod
Rychlost ohřevu		100 °C/hod
Rychlost ochlazování		100 °C/hod do 300 °C, potom v zábalu (Sibral)



Obr. 21. Dokončený svarový spoj

5. Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů a jejich vyhodnocení

Pro správnou funkci a bezpečný provoz zařízení musí být svarový spoj ověřen, že splňuje mechanické vlastnosti (destruktivní zkoušky) a že se ve svaru neobjevují povrchové či podpovrchové vady (nedestruktivní zkoušky).

Zkoušky slouží také pro vypracování specifikace svařování (WPS), což je dokument kvalifikovaný jedním ze způsobů schvalování. Obsahuje parametry a podmínky, při jejichž dodržení se zajistí opakovaně svarové spoje s požadovanými vlastnostmi. Protokol WPQR obsahuje všechny údaje, které jsou nutné pro kvalifikaci specifikace WPS.

Zkoušky se provádějí před zahájením výroby na zkušebních vzorcích. Je možno také ověřit mechanické vlastnosti na kontrolních svarových spojkách svařených při výrobě dané svařované konstrukce. Vyhodnocení probíhá porovnáním s dovolenými hodnotami uvedenými v materiálových normách nebo v platných normách v oboru svařování. [22]

5.1. Nedestruktivní zkoušky svarových spojů (NDT)

Tyto metody zkoušení svarových spojů se používají, aniž by se narušila jejich budoucí použitelnost nebo snížila schopnost plnit předpokládanou funkci. Využívá se přiměřené množství energie pro stanovení vlastností nebo pro nalezení vad ve svarovém spoji. [27]

Vady ve svarech jsou nebezpečné koncentrátoři napětí a ovlivňují velikost meze únavy. Svarový spoj vyhoví jen, pokud je bez vad, případně jsou tam jen takové vady, které neovlivní bezpečnost svarového spoje. Obecně je to jenom taková vada, která působí maximálně vrubovým účinkem a nehrozí z ní vytvoření trhliny. Vady se podle tvaru rozděluje na bodové, plošné a prostorové. Dle polohy vady se rozděluje na povrchové a vnitřní. [22]

Vady ve svarových spojkách vyrobených tavným svařováním se rozděluje do šesti skupin: [22]

- trhliny
- dutiny
- vměstky
- vady odtavování a závaru
- vady tvaru
- různé vady

Mezi základní metody NDT pro zjišťování povrchových vad patří tyto metody: [22]

- vizuální VT
- penetrační PT
- magnetická prášková MT
- vířivé proudy ET

Základní metody pro vnitřní vady jsou: [22]

- radiologické RT
- ultrazvukové UT

Pro vzorky svarových spojů v tomto experimentu byly provedeny tyto nedestruktivní zkoušky dle ČSN EN 12062: radiografická a magnetickým práškem.

5.1.1. Radiografická metoda

Metoda založená na principu průchodu záření X (rentgenové) nebo záření gama testovaným materiálem, jejím zeslabením při průchodu a záznam na fotografický film. Záření při průchodu materiálem ztrácí intenzitu, při průchodu vadou chybí zeslabení záření, proto je vada zobrazena jako tmavší pole. [27]

Typické objemové vady jsou póry, bubliny, řediny, staženiny. Plošné vady jsou trhliny, praskliny, studené spoje a zavaleniny. [27]

Pro dodržení kvality zkoušeného výrobku musí být dodrženy určité podmínky prozařování. Proto se při kontrole a vyhodnocování používají radiografické měřky. V dnešní době se používají už jen ke kontrole dodržení podmínek prozařování, tímto i ke kontrole citlivosti této metody. [27]

Zkouška proběhla dle ČSN EN ISO 17636-1 B. Byl testován celý svarový spoj, jako zdroj záření byl použit X-Ray SMART 200, typ záření RTG a typ filmu AGFA D5.

Číslo vzorku	Vyhodnocení	Výsledek
1/18 – 730°C/1h	-	Vyhovuje
2/18 – Bez TZ	-	Vyhovuje
3/18 – 730°C/3h	-	Vyhovuje

4/18 – 730°C/4h	-	Vyhovuje
5/18 – 730°C/5h	-	Vyhovuje

5.1.2. Magnetická prášková metoda

Metoda vychází z principu zmagnetizování testovaného vzorku, v místě trhliny se vytvoří magnetický rozptylový tok, který vystupuje nad povrch vzorku. Toto je indikováno magnetickým práškem. Trhlina musí být orientována nejlépe do směru kolmého ke směru magnetování, jinak magnetický tok není narušen a rozptylový tok se nevytvoří. Také magnetické pole musí mít dostatečnou intenzitu. [27]

Vada je nejlépe viditelná, pokud má souvislost přímo s povrchem, či těsně pod povrchem. S přibývajícím hloubkou klesá velikost rozptylového pole a indikace vady se stává těžce odlišitelnou od dalších rušivých vlivů. Magnetický prášek musí být z feromagnetického materiálu o vysoké permeabilitě, aby se dal snadno zmagnetovat. [27]

Pro ověření, zda podmínky měření jsou takové, které zaručují správný průběh zkoušky, se používají měrky. Měrky napodobují vady v materiálu, podle které se dá určit citlivost měření. [27]

Zkouška proběhla dle ČSN EN ISO 17638 nástřikem magnetického prášku Chemetal, použitím magnetizačního zařízení UM 8 Helling, měrky Berthold.

Číslo vzorku	Indikace	Výsledek
1/18 – 730°C/1h	-	Vyhovuje
2/18 – Bez TZ	-	Vyhovuje
3/18 – 730°C/3h	-	Vyhovuje
4/18 – 730°C/4h	-	Vyhovuje
5/18 – 730°C/5h	-	Vyhovuje

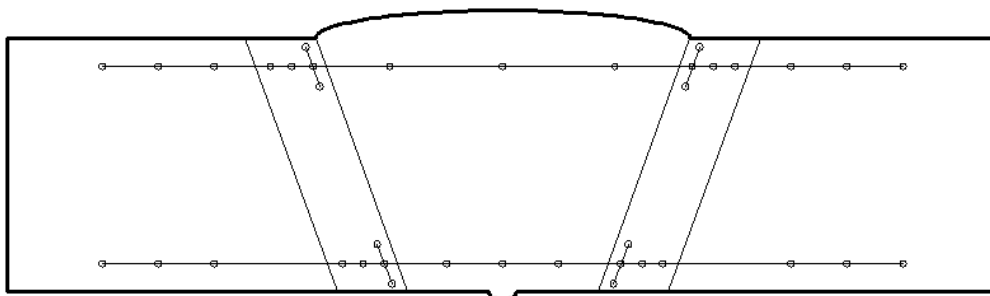
5.2. Destruktivní zkoušky svarových spojů

Mezi základní destruktivní zkoušky svarových spojů patří:

- zkoušky tvrdosti
- zkoušky mikrotvrdosti
- zkoušky tahem
- zkoušky rázem v ohybu
- zkoušky lámavosti
- zkoušky makrostruktury a mikrostruktury

5.2.1. Zkouška tvrdosti

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 1043-1. Tvrdost musí být měřena na všech částech svarového spoje, tzn. základní materiál, TOO a svarový kov. Použita byla metoda dle Vickerse HV 10 při 20 °C. Vzdálenost mezi vtisky je doporučena nejméně 1 mm od předchozího vtisku.

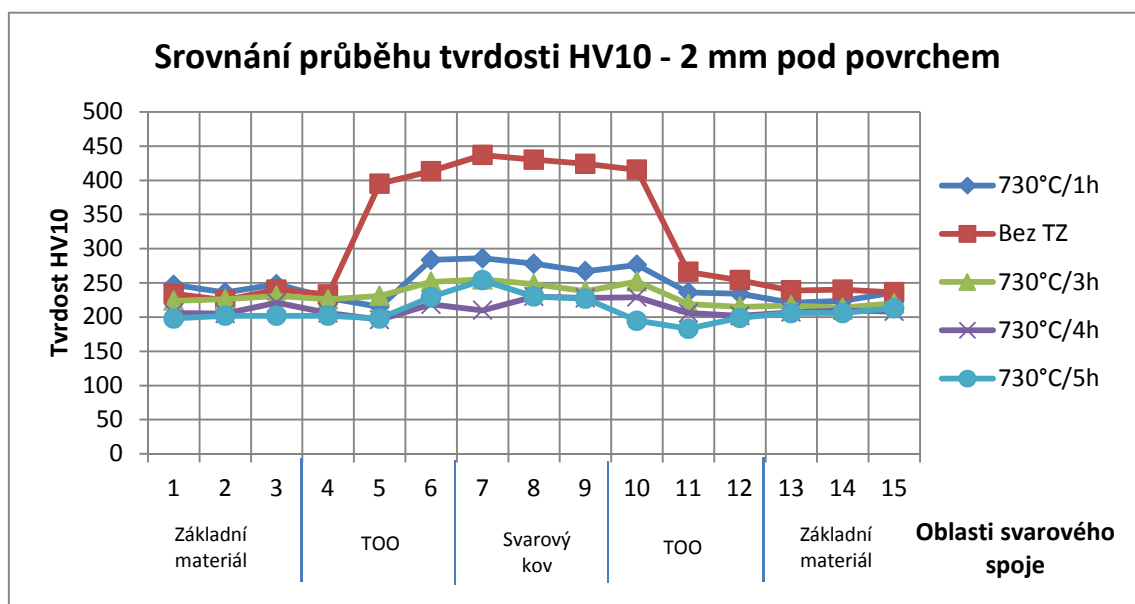


Obr. 22. Místa měření tvrdosti

Tab. 9. Hodnoty tvrdosti HV10 pro jednotlivé svarové spoje – 2 mm pod povrchem

Číslo vzorku	Oblast vpichu - 2mm pod povrch	Základní materiál			TOO			Svarový kov			TOO			Základní materiál		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1/18	730°C/1h	247	236	248	228	215	284	286	278	267	276	236	234	221	224	236
2/18	Bez TZ	234	225	240	233	395	413	437	430	424	415	266	254	239	240	236
3/18	730°C/3h	224	226	231	226	231	252	255	248	238	252	219	215	217	214	220
4/18	730°C/4h	206	205	221	206	196	219	210	230	228	229	206	202	207	210	208
5/18	730°C/5h	198	202	202	202	198	229	254	230	227	195	183	199	206	206	213

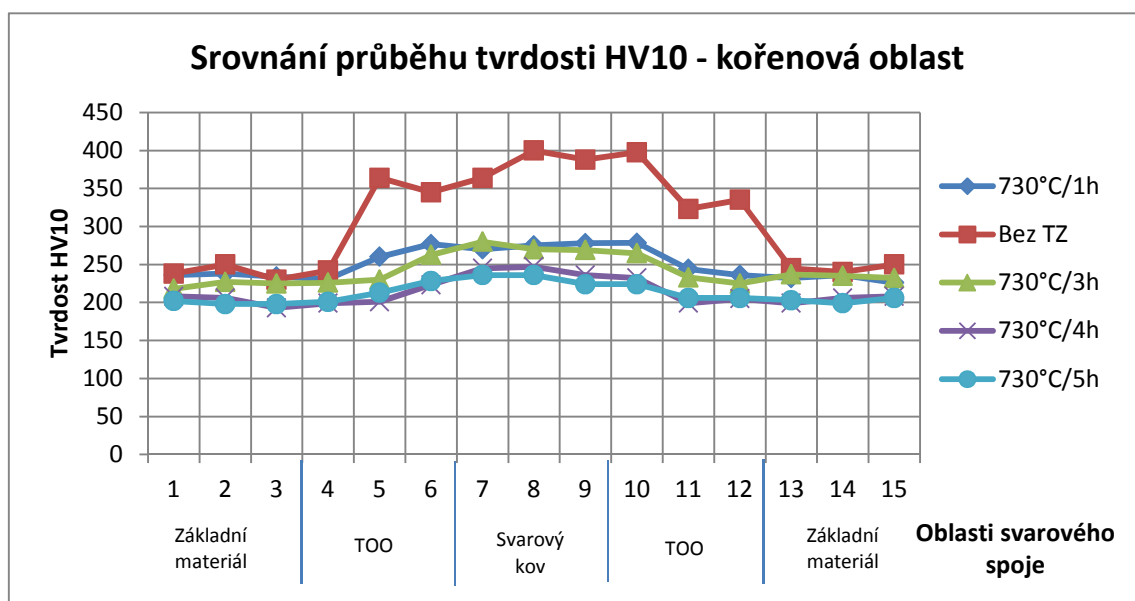
Graf. 1.



Tab. 10. Hodnoty tvrdosti HV10 pro jednotlivé svarové spoje - kořenová oblast

Číslo vzorku	Oblast vpichu - kořenová oblast	Základní materiál			TOO			Svarový kov			TOO			Základní materiál		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1/18	730°C/1h	236	238	234	231	260	277	270	275	278	278	244	236	232	236	226
2/18	Bez TZ	238	250	230	242	364	345	364	400	388	398	323	335	245	240	250
3/18	730°C/3h	218	227	225	226	230	263	280	270	269	265	233	225	237	235	232
4/18	730°C/4h	208	206	193	199	201	223	245	247	236	232	199	205	199	206	208
5/18	730°C/5h	202	198	198	201	213	228	236	236	224	224	206	206	203	199	206

Graf. 2.



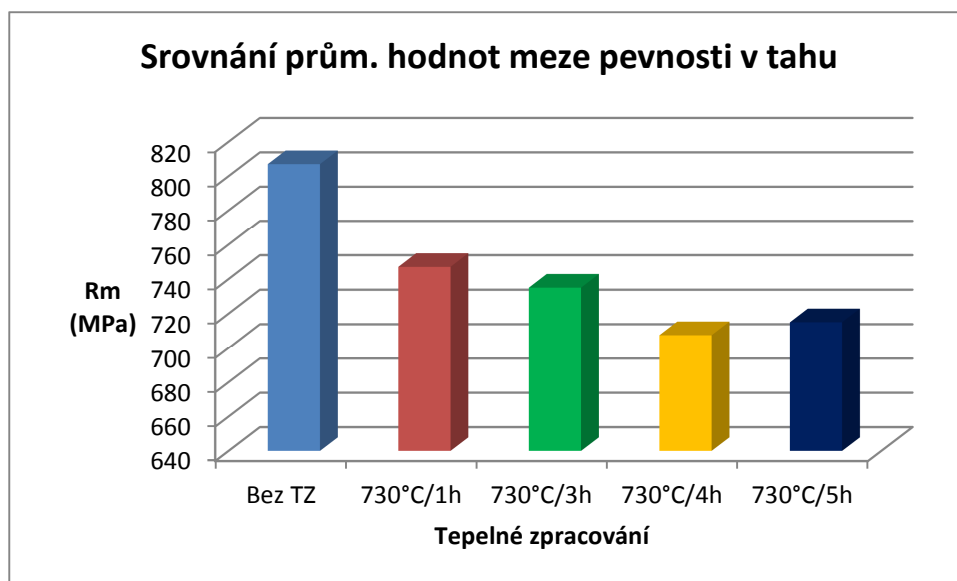
5.2.2. Příčná zkouška tahem

Zkouška proběhla dle ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 4136 při teplotě +20 °C. Základní materiál dosahuje meze pevnosti 620 – 850 MPa.

Tab. 11. Přehled dosažených hodnot meze pevnosti v tahu R_m (MPa)

Číslo vzorku	Dosažené výsledky	Průměrná hodnota	Výsledek
2/18 – Bez TZ	810 804	807	Vyhovuje
1/18 – 730°C/1h	756 738	747	Vyhovuje
3/18 – 730°C/3h	731 739	735	Vyhovuje
4/18 – 730°C/4h	708 707	707,5	Vyhovuje
5/18 – 730°C/5h	715 715	715	Vyhovuje

Graf. 3.



5.2.3. Zkouška rázem v ohybu

Zkouška proběhla dle ČSN EN ISO 148-1 a ČSN EN ISO 9016 při teplotě +20 °C. Byly odebrány standardní rozměry zkušebních tyčí 10x10 mm, KV₂. Vzorky by měly dosahovat hodnot nad 27 J.

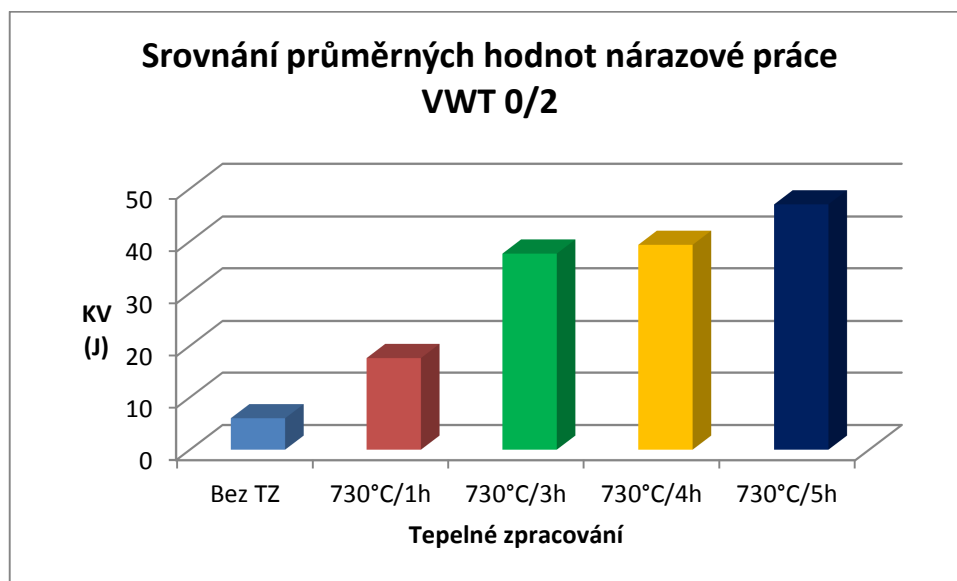
Odběr vzorků proběhl ze dvou oblastí svarového spoje:

- VWT 0/2 (V – Charpy V vrub, W - vrub ve svarovém kovu, T – napříč tloušťkou, v ose svaru 2 mm pod povrchem)
- VHT 2/2 (V – Charpy V vrub, H – vrub v tepelně ovlivněné oblasti, T – napříč tloušťkou, 2 mm od hranice ztavení směrem od svarového kovu a 2 mm pod povrchem)

Tab. 12. Přehled dosažených hodnot u zkoušky rázem v ohybu VWT 0/2 (J)

Číslo vzorku	Dosažené výsledky	Průměrná hodnota	Výsledek
2/18 – Bez TZ	6 6 6	6	Nevyhovuje
1/18 – 730°C/1h	15 22 16	17,7	Nevyhovuje
3/18 – 730°C/3h	36 38 39	37,7	Vyhovuje
4/18 – 730°C/4h	45 39 34	39,3	Vyhovuje
5/18 – 730°C/5h	55 45 41	47	Vyhovuje

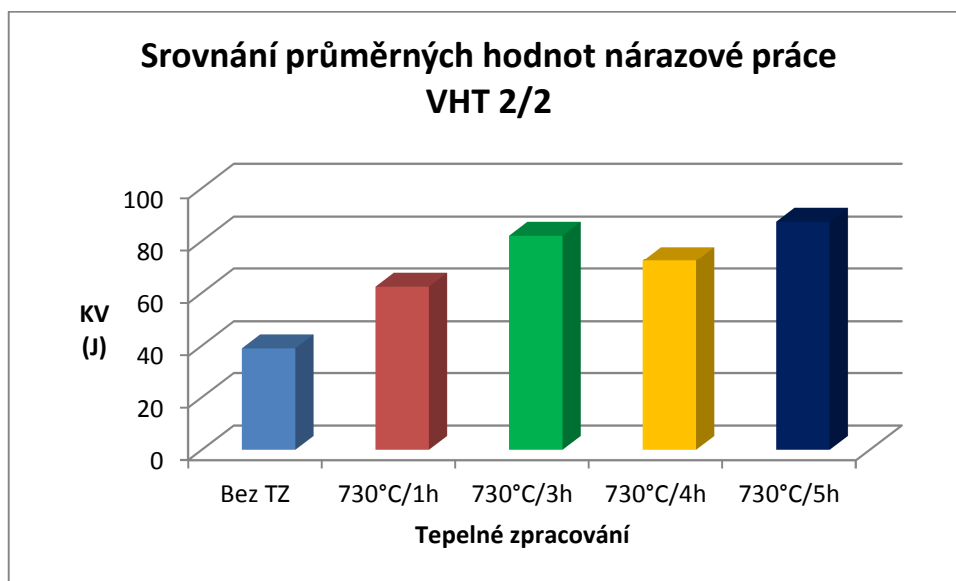
Graf. 4.



Tab. 13. Přehled dosažených hodnot u zkoušky rázem v ohybu VHT 2/2 (J)

Číslo vzorku	Dosažené výsledky	Průměrná hodnota	Výsledek
2/18 – Bez TZ	42 34 41	39	Vyhovuje
1/18 – 730°C/1h	65 59 63	62,3	Vyhovuje
3/18 – 730°C/3h	78 80 88	82	Vyhovuje
4/18 – 730°C/4h	75 69 73	72,3	Vyhovuje
5/18 – 730°C/5h	93 82 87	87,3	Vyhovuje

Graf. 5.



Z tabulky č. 12 a grafu č. 4 je patrné to, že vzorky 1/18 a 2/18 odebrané ze svarového kovu nevyhověly zkoušce. Nedosáhly minimální požadované hodnoty nárazové práce 27J. Je zřejmé, že svary martenzitické oceli P92 bez tepelného zpracování a s tepelným zpracováním po dobu jedné hodiny při 730 °C nesmí být použity. Tepelné zpracování je nedostačující. Nad minimální hodnotu 27 J se dostaly až další vzorky s dobou tepelného zpracování tří a více hodin.

Dle tabulky č. 13 a grafu č. 5 všechny výsledné hodnoty nárazové práce VHT u vzorků odebraných z oblasti TOO jsou vyhovující. U vzorku č. 2/18 bez tepelného zpracování je naměřená hodnota 39 J, což je vyhovující hodnota. Použití svarového spoje bez tepelného zpracování bylo ale již vyloučeno ve výsledcích VWT.

5.3. Metalografické zkoušky svarových spojů

Tyto zkoušky patří také mezi destruktivní zkoušky. Podle velikosti zvětšení se dělí metalografické na zkoušky makrostrukturní a mikrostrukturní. Vzorek musí být dokonale připraven, obroušen, vyleštěn a naleptán. Výsledky jsou zaznamenány fotograficky.

Makrostruktura se posuzuje okem případně při malém zvětšení (do 5x) lupou či mikroskopem. Kontrolují se zejména tvar svaru, svarové housenky, kořen, vady ve svaru (póry, vměstky, studené spoje, trhliny) a šířka TOO.

Mikrostruktura se posuzuje pod mikroskopem při zvětšení 30x až 2000x. Vyhodnocují se hlavně vzhled mikrostruktury, množství a rozložení strukturních fází a složek ve svarovém kovu, TOO a v základním materiálu. Dá se také hodnotit typ a rozložení vměstků, velikost zrna, případně jeho zhrubnutí. [22]

5.3.1. Makrostruktura svarového spoje

Vzorky byly podrobeny makroskopickému zkoumání při zvětšení 2x. Pro naleptání vzorku bylo použito leptadlo Adler-Mattinga, aplikace leptadla potíráním. Vyhodnocení proběhlo dle ČSN 15614-1.

Tab. 14. Výsledky makrostruktury svarových spojů

Číslo vzorku	Vyhodnocení	Výsledek
1/18 – 730°C/1h	Studený spoj, neúplné vyplnění svaru	Nevyhovuje
2/18 – Bez TZ	Studený spoj, struskový vměstek, neúplné vyplnění svaru	Nevyhovuje
3/18 – 730°C/3h	Trhlina, pór, neúplné vyplnění svaru	Nevyhovuje
4/18 – 730°C/4h	Bez vad	Vyhovuje
5/18 – 730°C/5h	Bez vad	Vyhovuje



Obr. 23. Makrostruktura vzorku 1/18 (zv. 2x)



Obr. 24. Makrostruktura vzorku 2/18 (zv. 2x)



Obr. 25. Makrostruktura vzorku 3/18 (zv. 2x)



Obr. 26. Makrostruktura vzorku 4/18 (zv. 2x)

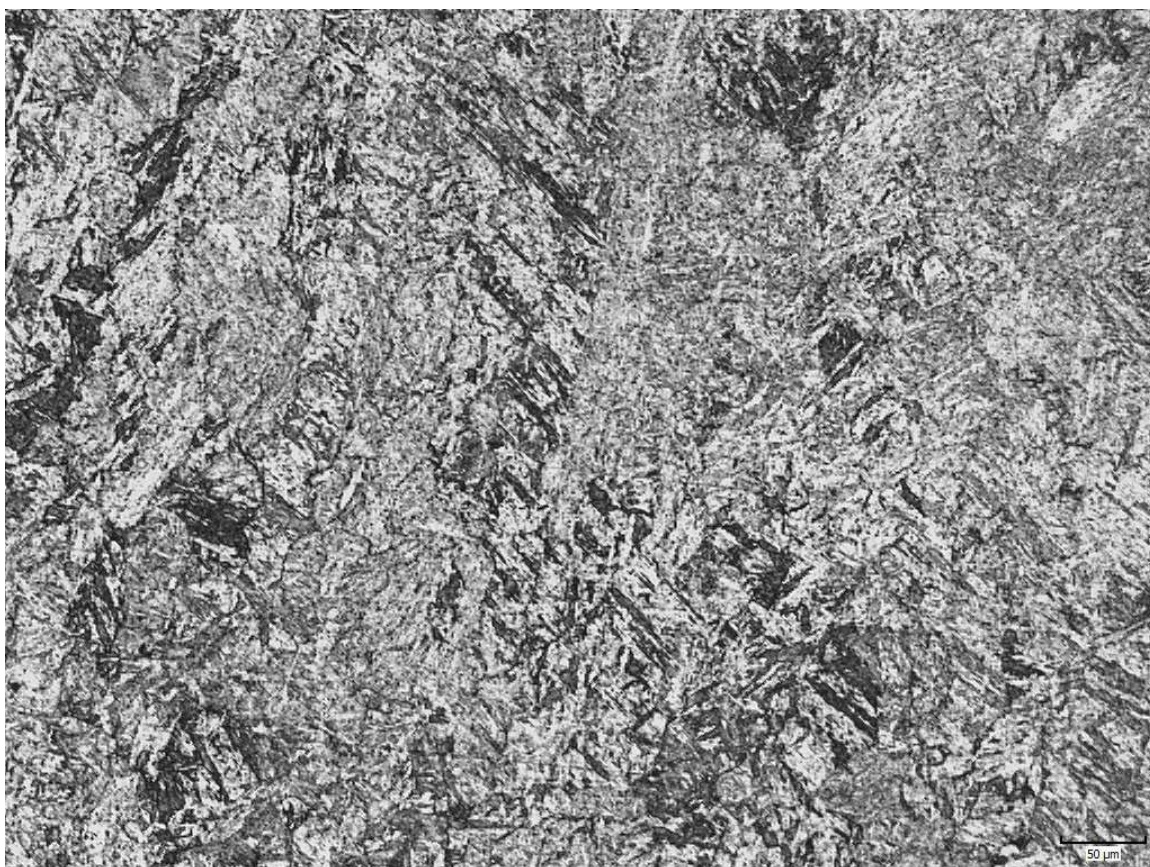


Obr. 27. Makrostruktura vzorku 5/18 (zv. 2x)

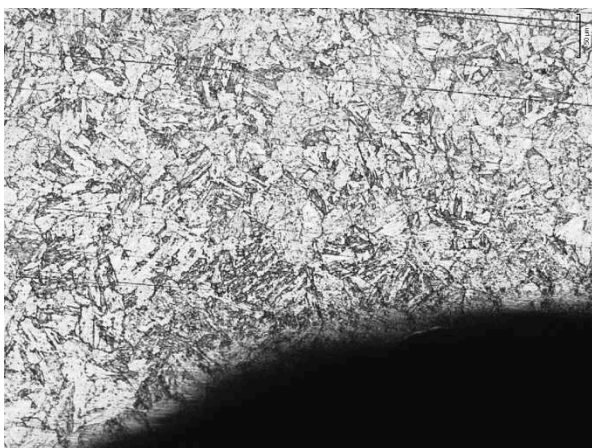
5.3.2. Mikrostruktura svarového spoje

Vzorky byly podrobeny mikroskopickému zkoumání při zvětšení 100x po naleptání.

Mikrostruktura vzorku 1/18, 730°C/1h



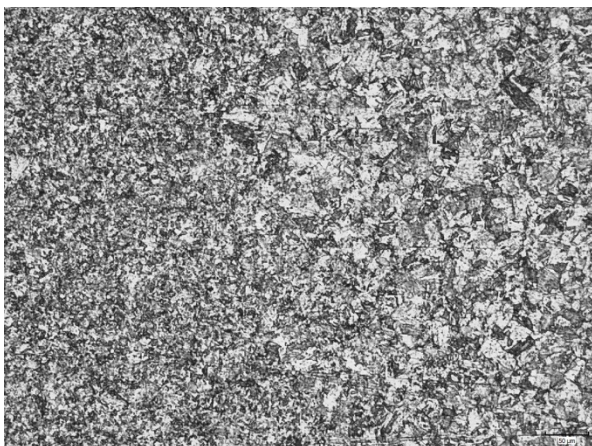
Obr. 28. Mikrostruktura vzorku 1/18 - svarový kov (zv.100x)



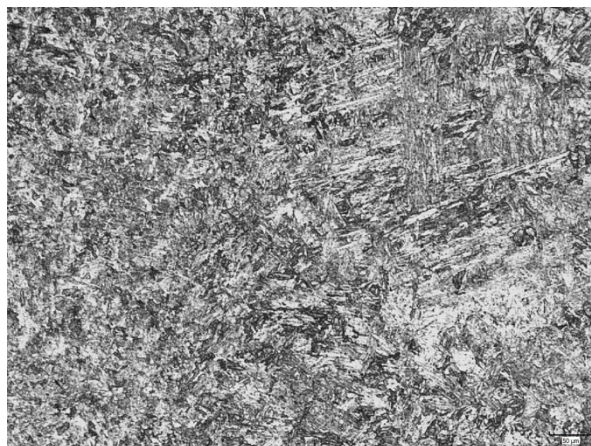
Obr. 29. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hran. sv. kovu a pásma přehřátí (zv.100x)



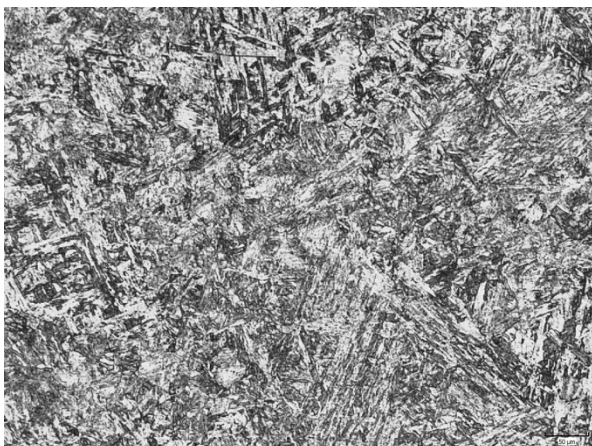
Obr. 30. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hran. pásma přehřátí a normaliz. (zv.100x)



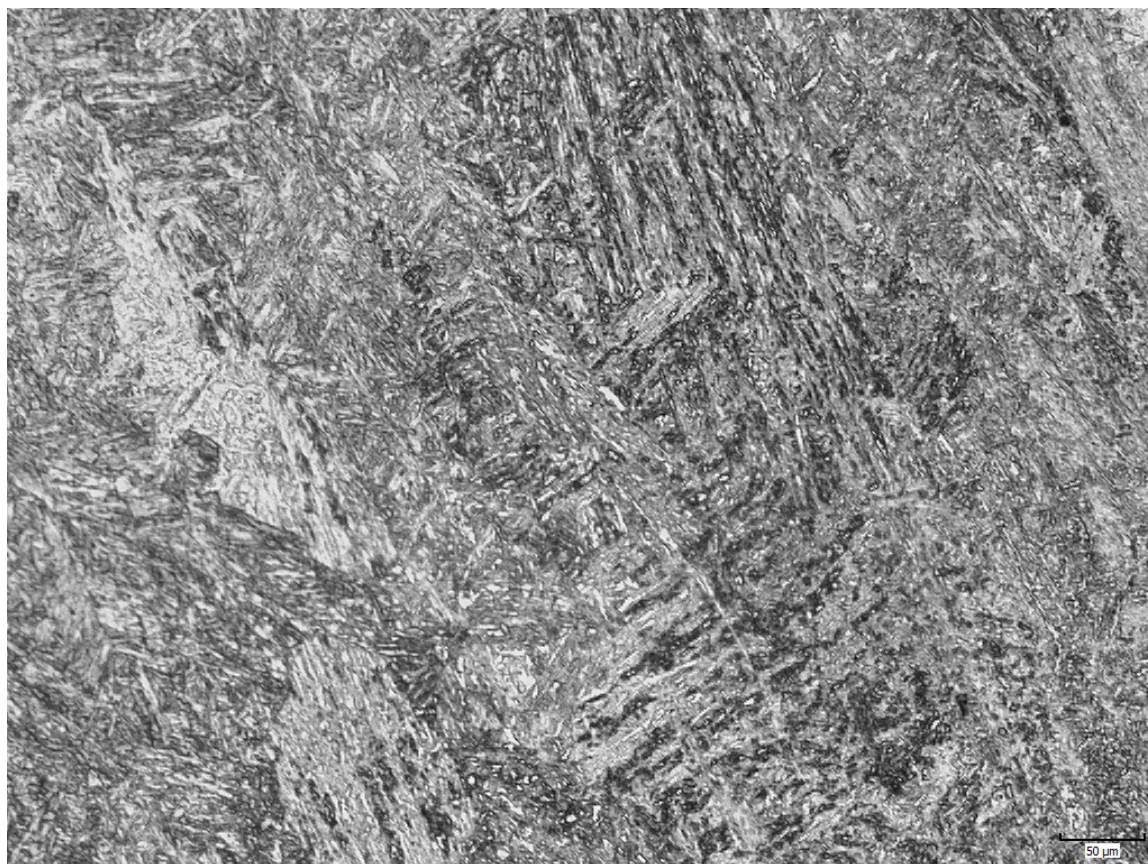
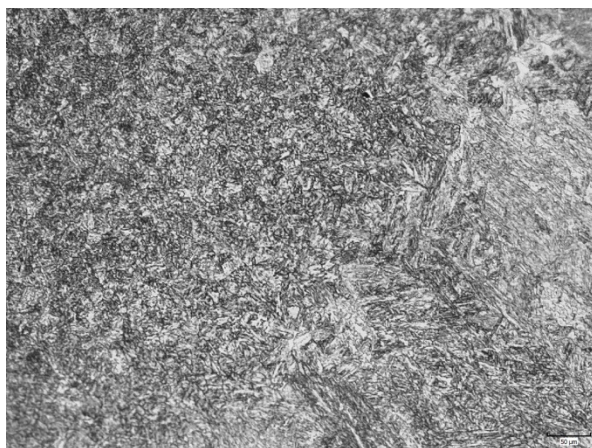
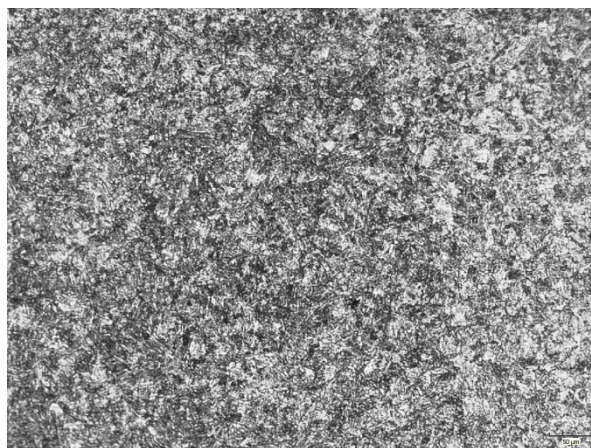
Obr. 31. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hranice pásma normalizace a částečné překrystalizace (zv.100x)

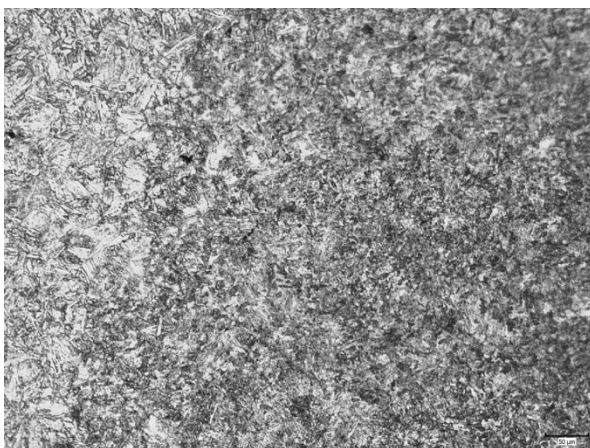


Obr. 32. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hranice pásma část. překrystalizace a ZM (zv.100x)

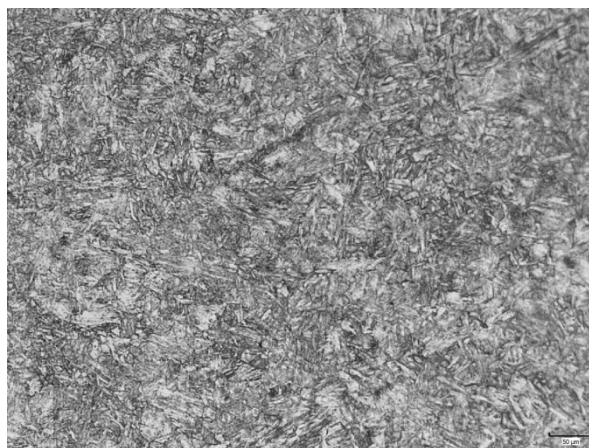


Obr. 33. Mikrostruktura vzorku 1/18 – základní materiál (zv.100x)

Mikrostruktura vzorku 2/18, Bez TZ**Obr. 34.** Mikrostruktura vzorku 2/18 - svarový kov (zv.100x)**Obr. 35.** Mikrostruktura vzorku 2/18 – hranice svarového kovu a pásma přehřátí (zv.100x)**Obr. 36.** Mikrostruktura vzorku 2/18 - pásmo normalizace (zv.100x)

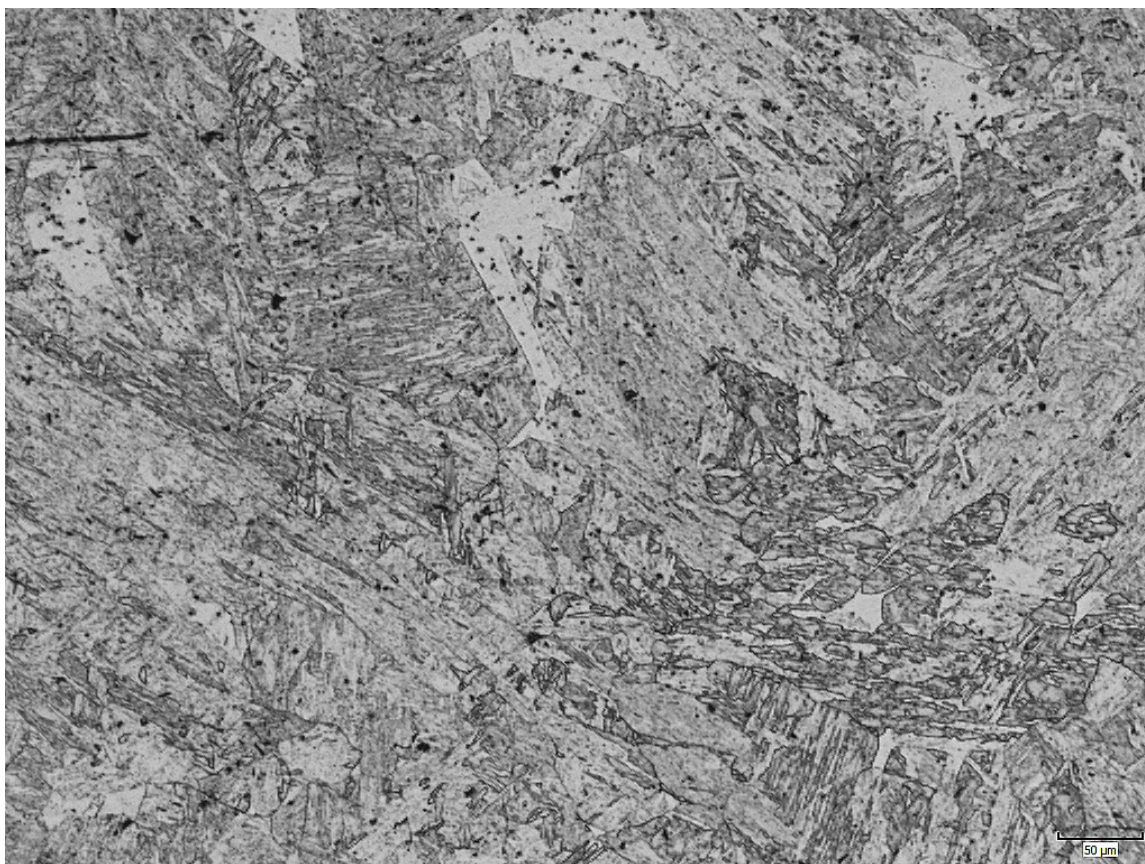


Obr. 37. Mikrostruktura vzorku 2/18 - pásmo částečné překrystalizace (zv.100x)

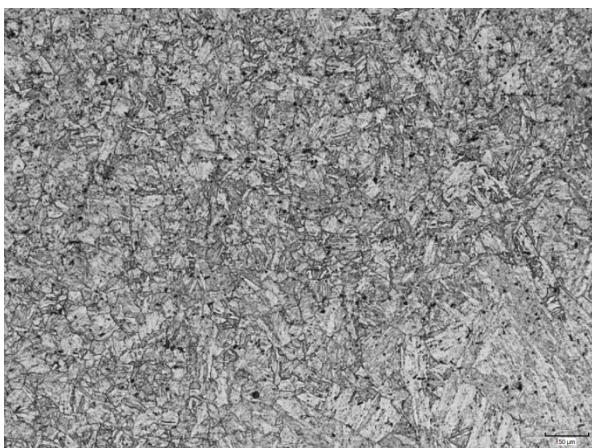


Obr. 38. Mikrostruktura vzorku 2/18 – základní materiál (zv.100x)

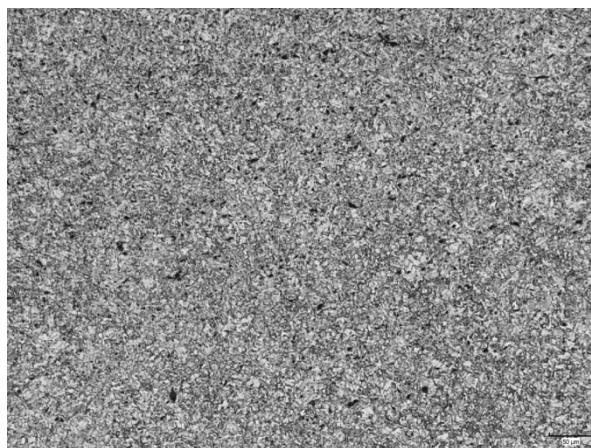
Mikrostruktura vzorku 3/18, 730°C/3h



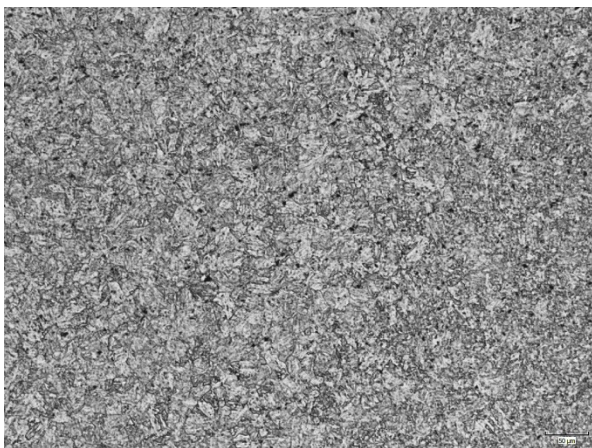
Obr. 39. Mikrostruktura vzorku 3/18 - svarový kov (zv.100x)



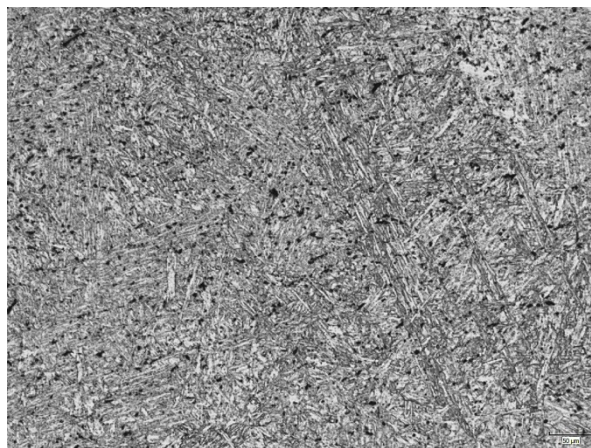
Obr. 40. Mikrostruktura vzorku 3/18 – hranice svarového kovu a pásma přehřátí (zv.100x)



Obr. 41. Mikrostruktura vzorku 3/18 - pásma normalizace (zv.100x)



Obr. 42. Mikrostruktura vzorku 3/18 - pásma částečné překrystalizace (zv.100x)



Obr. 43. Mikrostruktura vzorku 3/18 – základní materiál (zv.100x)

Mikrostruktura ukazuje jednotlivé pásma TOO a hranice těchto pásem, kde jsou viditelné struktury a jednotlivé přechody mezi nimi. Mikrostruktura svarového kovu vzorku 2/18 je tvořena martenzitem, u vzorků 1/18 a 3/18 se jedná o popuštěný martenzit. U vzorku 3/18 se navíc v popuštěném martenzitu vyskytují karbidy, zřejmě $M_{23}C_6$.

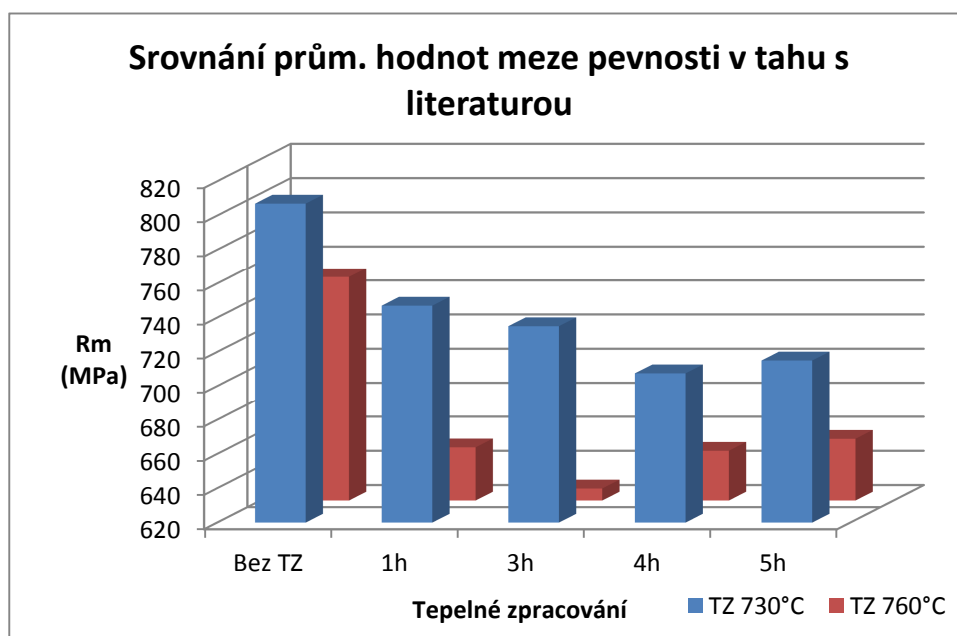
6. Srovnání dosažených výsledků s dostupnými výsledky

Dosažené hodnoty v tomto experimentu jsou v této kapitole porovnány s hodnotami v experimentech, které byly uskutečněny v minulosti. Jelikož byla velikost teploty v předchozích experimentech [28], [29], [30] jiná (760 °C), je možno pozorovat, jak toto ovlivňuje výsledné vlastnosti svarového spoje.

6.1. Srovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu

V grafu č. 6 je viditelný pokles pevnosti při tepelném zpracování s teplotou 760 °C oproti tepelnému zpracování při teplotě 730 °C.

Graf. 6. Srovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu s literaturou [28], [29]

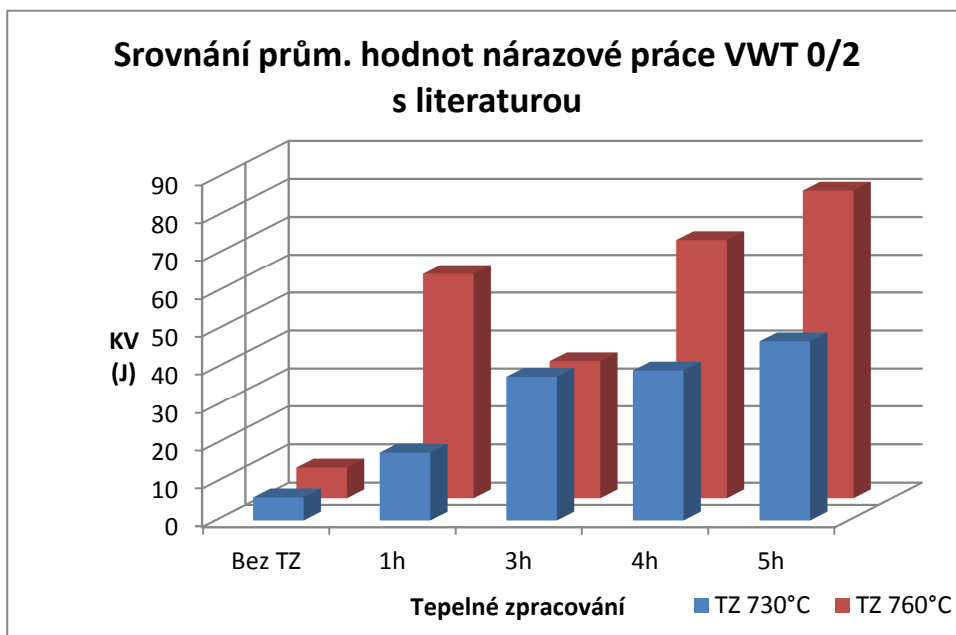


Hodnoty z literatury [28], [29] ukazují pokles pevnosti při tepelné zpracování do tří hodin. Tato hodnota se pohybuje už jenom těsně nad dovolenou hodnotou 620 MPa pro vzorek, který vyhovuje požadované pevnosti základního materiálu a svarového kovu. Nad tuto hodnotu pevnost zase mírně vzrůstá. Hodnoty pevnosti vyhovují při obou způsobech tepelného zpracování. U vzorků, které byly zpracovávány v této diplomové práci, je viditelný mírný nárůst pevnosti až při tepelném zpracování pěti hodin.

6.2. Srovnání průměrných hodnot nárazové práce VWT 0/2

Při delších dobách tepelného zpracování, jsou v grafu č. 7 zřetelné vyšší hodnoty nárazové práce u použití vyšších teplot tepelného zpracování 760 °C. Při hodnotách výdrže čtyři a pět hodin je velikost hodnoty nárazové práce u testovaných vzorků s tepelným zpracováním 730 °C skoro poloviční ve srovnání s literaturou. [28], [30]

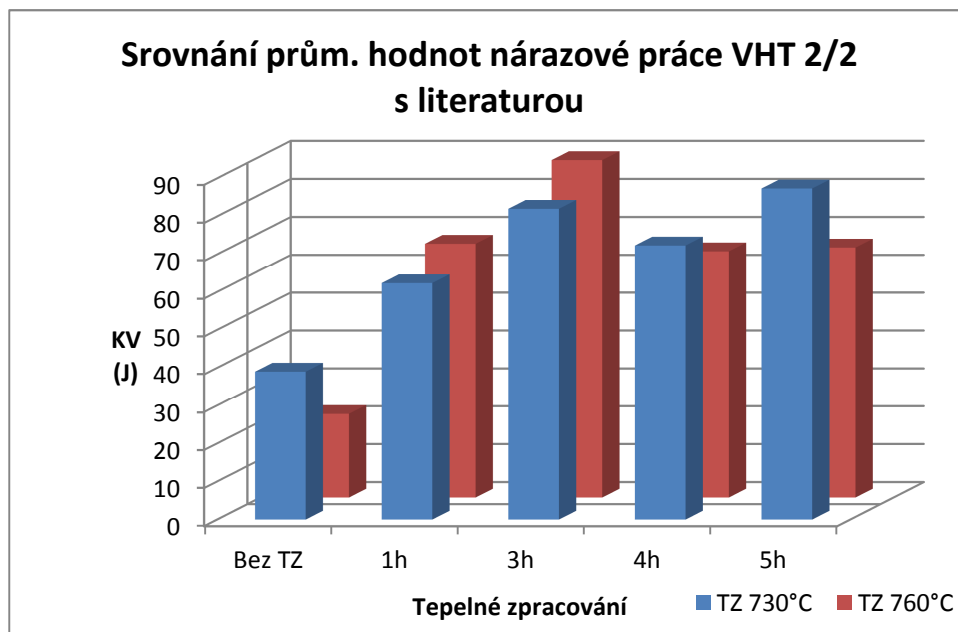
Graf. 7. Srovnání průměrných hodnot nárazové práce VWT 0/2 s literaturou [28], [30]



Z výsledků je patrný růst hodnot nárazové práce s rostoucí výdrží na teplotě. Při delší výdrži je patrný rostoucí trend velikosti nárazové práce. Určité odchylky u hodnot z literatury [28] a [30] mohou být z důvodu testování vzorků z rozdílných taveb.

6.3. Srovnání průměrných hodnot nárazové práce VHT 2/2

Graf. 8. Srovnání průměrných hodnot nárazové práce VHT 2/2 s literaturou [28], [30]



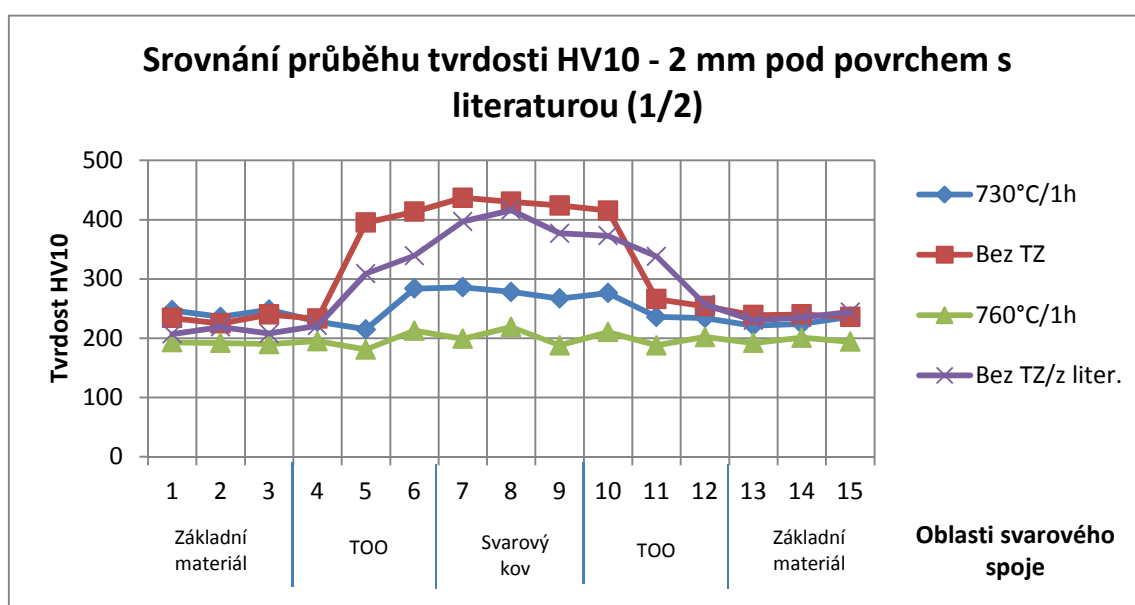
V grafu č. 8 je obdobné srovnání s předchozími výsledky jako v předešlém grafu č. 7 s rozdílem místa odebrání testovaného vzorku (TOO). Hodnoty nárazové práce při tepelném zpracování 760 °C překračují hodnoty z tohoto experimentu jen u výdrže jedna a tři hodiny. Pro ostatní výdrže jsou hodnoty pod dosaženými výsledky z tohoto experimentu. Je vidět, že i menší snížení teploty tepelného zpracování, ovlivňuje velikost hodnot nárazové práce.

Určité výchyly v hodnotách mohou být zapříčiněny nepřesně umístěným vrubem v jednom z pásů TOO. Šířka TOO je přibližně 2-3 mm. Proto i sebemenší nepřesnost v umístění testovaného vzorku může ovlivnit výslednou hodnotu nárazové práce. [29]

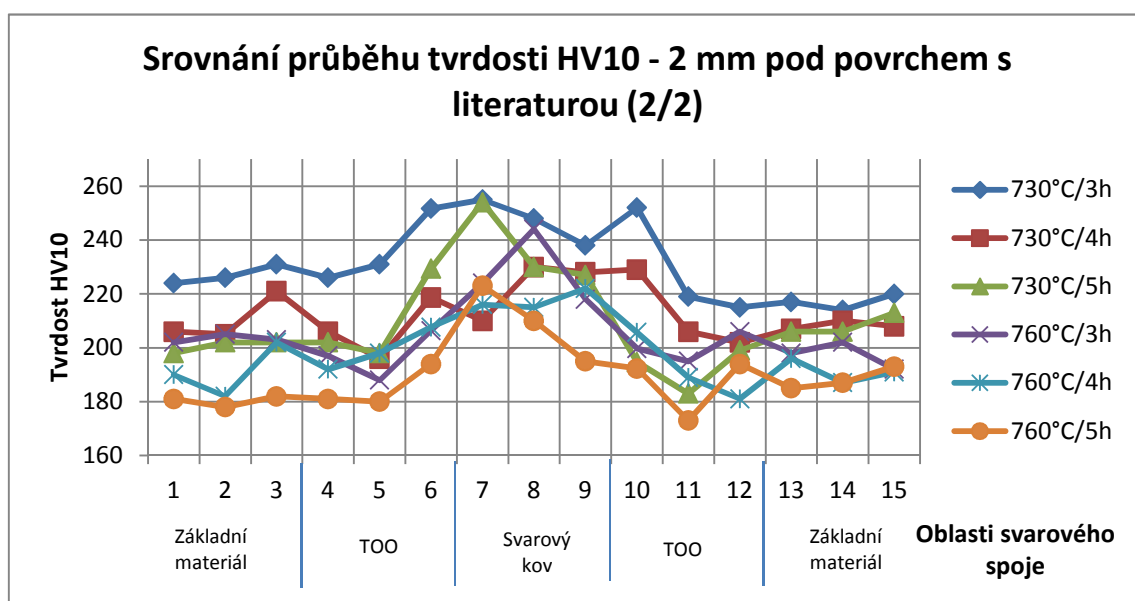
6.4. Srovnání průměrných hodnot tvrdosti 2 mm pod povrchem

Pro přehlednost jsou výsledky rozděleny do dvou grafů (č. 9 a 10). V prvním jsou uvedeny hodnoty pro vzorky bez tepelného zpracování a pro zpracování jednu hodinu. Ve druhém grafu jsou zbývající vzorky s tepelným zpracováním tři, čtyři a pět hodin. V každém z nich jsou srovnány výsledky mezi dosaženými hodnotami v tomto experimentu a s hodnotami z předchozích experimentů [28], [29], [30].

Graf. 9. Srovnání průběhu tvrdosti HV10 – 2mm pod povrchem s literaturou [28], [30]



Graf. 10. Srovnání průběhu tvrdosti HV10 – 2mm pod povrchem s literaturou [28], [30]



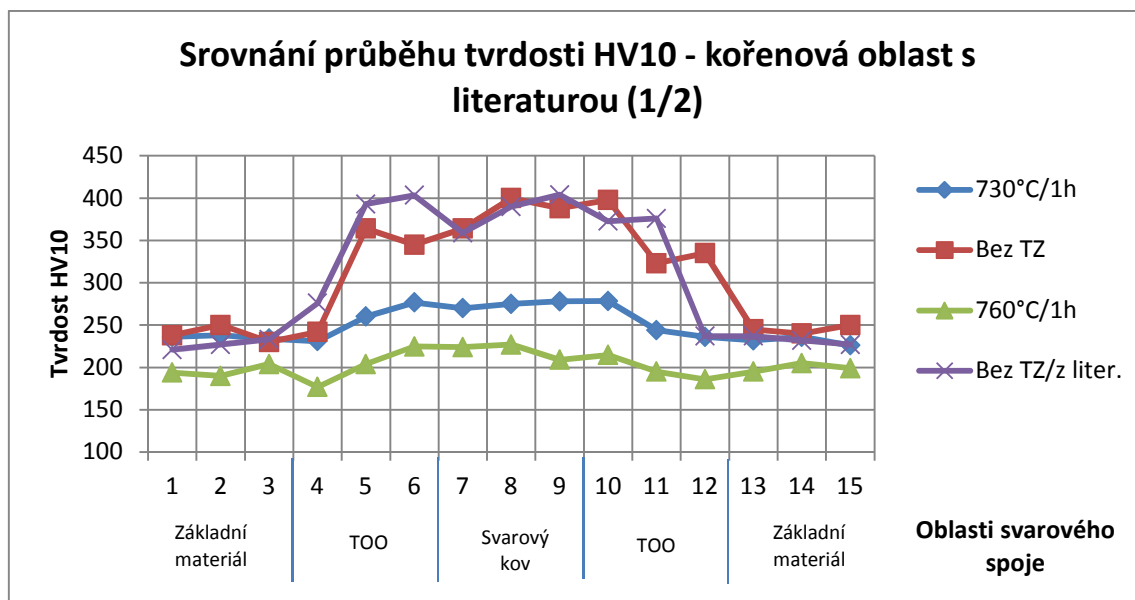
Hodnoty tvrdosti v grafu č. 9 pro oba vzorky bez tepelného zpracování vykazují zvýšenou tvrdost v oblasti TOO a svarového kovu. Toto může mít negativní vliv na výslednou kvalitu svarového spoje, proto je nezbytné provádět tepelnou úpravu po svařování materiálu P92. Hodnoty nad 350 HV jsou z hlediska normy nepřijatelné.

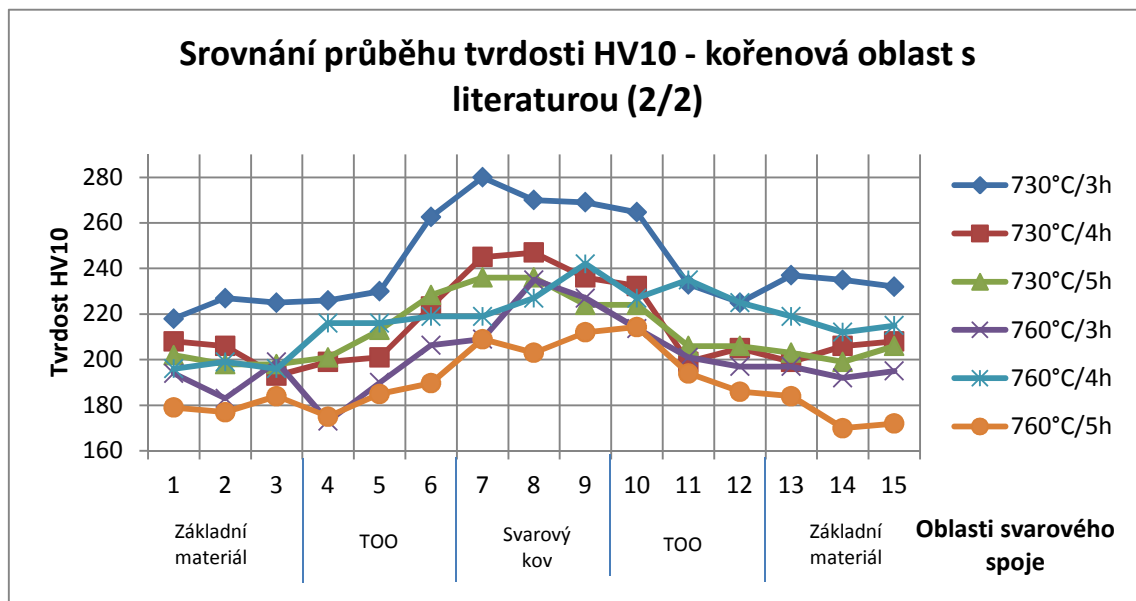
U vzorků s tepelným zpracováním jedna hodina je vidět značný pokles tvrdosti. Při vyšší teplotě tepelného zpracování 760 °C je viditelná nižší hodnota tvrdosti v oblasti TOO a svarového kovu, která se velmi blíží tvrdosti základního materiálu. Už i hodinová výdrž na teplotě je přijatelná pro výslednou vlastnost svarového spoje z hlediska tvrdosti.

6.5. Srovnání průměrných hodnot tvrdosti v kořenové oblasti

Taktéž porovnání výsledků zkoušek tvrdosti v kořenové oblasti jsem pro přehlednost rozdělil do dvou grafů (č. 11 a 12). První graf ukazuje porovnání mezi vzorky bez tepelného zpracování a s tepelným zpracováním jednu hodinu. Druhý graf porovnává vzorky s tepelným zpracováním tři, čtyři a pět hodin.

Graf. 11. Srovnání průběhu tvrdosti HV10 – kořenová oblast s literaturou [30]



Graf. 12. Srovnání průběhu tvrdosti HV10 – kořenová oblast s literaturou [28], [29]

Vzorky bez tepelného zpracování s vysokými hodnotami tvrdosti nejsou přípustné. Při zpracování jedna hodina je znatelný pokles tvrdosti. Výrazně vyšší pokles je u zpracování při 760 °C, viz. graf č.11.

V grafu č. 12 srovnání ukazuje, také větší pokles tvrdosti v porovnání vzorků s tepelným zpracováním 760 °C, než s tepelným zpracováním 730 °C. Nejpriznivější doba tepelného zpracování, z pohledu tvrdosti v kořenové oblasti, se jeví pět hodin při 760 °C.

7. Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval studiem moderních žárovevých ocelí pro bloky tepelných elektráren s nadkritickými parametry. Připravil jsem rešerši o jejich vývoji a použitelnosti s důrazem na vývoj modifikované martenzitické oceli P92. Dále jsem popsal parametry ovlivňující výslednou strukturu a vlastnosti oceli P92, její mikrostrukturu a tepelné zpracování. Uvedl jsem svařitelnost této oceli a vybral možné přídavné materiály pro svařování.

V další části jsem se zabýval technologiemi svařování. Popsal jsem princip a svařovací zdroje pro metody 111 (ruční obloukové svařování obalenou elektrodou) a 141 (obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu).

V experimentální části bylo provedeno svaření zkušebních vzorků (plech 18 mm) materiálu P92, za použití obou popsaných metod. První vzorek bych pro srovnání ponechán bez tepelného zpracování. Na další vzorky bylo aplikováno tepelné zpracování při teplotě 730 °C po dobu jedné, třech, čtyřech a pěti hodin. Následně bylo provedeno destruktivní a nedestruktivní testování pro objektivní hodnocení vlastností svarových spojů.

Jako nedestruktivní zkoušky byly provedeny zkouška RT radiografická pro zjištění vnitřních vad s vyhovujícím výsledkem. MT magnetická prášková zkouška proběhla také s výsledkem vyhovujícím pro všechny vzorky.

Byly provedeny tyto destruktivní zkoušky: zkouška tvrdosti, příčná zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu VWT a VHT. Vzorky pro zkoušku tvrdosti posloužily také pro posouzení makrostruktury a mikrostruktury.

Nejnižší naměřená pevnost byla u vzorku s tepelným zpracováním čtyři hodiny. Tento výsledek je stále vyhovující. Hodnoty naměřené zkouškou rázem v ohybu ve svarovém kovu (VWT) a v TOO (VHT) ukázaly přibližně lineárně vzrůstající trend se vzrůstající dobou tepelného zpracování. Výsledky byly nevyhovující jen pro vzorky bez tepelného zpracování a s tepelným zpracováním jedna hodina u zkoušky VWT. Mírná odchylka v lineárnosti se ukázala také u vzorku s tepelným zpracováním čtyři hodiny.

Porovnání s výsledky z literatury ukázaly nižší hodnoty pevnosti u tepelného zpracování při 760 °C. Hodnoty nárazové práce VWT byly v literatuře převážně vyšší než v tomto experimentu. Výsledky nárazové práce VHT z literatury byly přibližně odpovídající hodnotám v tomto experimentu. Tímto se potvrdily teoretické předpoklady.

Hodnoty tvrdosti bez tepelného zpracování jsou příliš vysoké v oblasti svarového kovu a TOO. Hodnoty nad 350 HV nejsou podle normy přijatelné. Závěr z tohoto srovnání je, že nejvýhodnější tepelné zpracování při 730 °C se jeví s délkou tři hodiny.

V experimentu se potvrdilo, že je velice důležité dodržovat svařovací parametry (tepelný příkon, teplotu předehřevu a interpass), přídavný materiál musí mít nízký obsah difuzního vodíku a musí být patřičně vysušený. Ve třech testovaných vzorcích se objevily makroskopické vady svarového spoje: studené spoje, struskové vměstky, trhliny a neúplné vyplnění svaru). Mimo jiné je nutno důsledně odstraňovat zbytky strusky před zahájením svařování následující svarové housenky. Zjištěné vady nemají v tomto případě velký vliv na výsledek experimentu, jelikož nebyl pozorován výrazný pokles výsledných mechanických vlastností svarového spoje. Pro tvorbu skutečné WPS, tímto i WPQR by se však musel experiment opakovat.

Seznam použité literatury

[1. **FISCHER, W. J.** SGT-8000H Product Line, Actual Update. [Online] Siemens AG. [Citace: 21. 10 2013.] http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/energy-topics/publications/Technical%20Papers/Gas%20Turbines/PowerGen_Europe_2012_Cologne_SGT-8000H_Update_Fischer.pdf.

2. **FRANKE, J. a KRÁL, R.** Supercritical boiler technology for future market condition. [Online] [Citace: 22. 10 2013.] http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson%20boiler/Supercritical_Boiler_Technology_for_Future_Market_Conditions.pdf.

3. **LOMOZIK, M., ZEMAN, M. a BRÓZDA, J.** Modern martensitic steel for power industry. [Online] [Citace: 23. 10 2013.] [http://www.rmccet.com/lib/E-Journals/Archives%20of%20Civil%20and%20Mechanical%20Engineering/Volume%2012,%20Issue%201,%20Pages%201-104%20\(March%202012\)/Modern%20martensiticsteelsforpowerindustry.pdf](http://www.rmccet.com/lib/E-Journals/Archives%20of%20Civil%20and%20Mechanical%20Engineering/Volume%2012,%20Issue%201,%20Pages%201-104%20(March%202012)/Modern%20martensiticsteelsforpowerindustry.pdf).

4. **BULLINGER, P.** Enhanced Water/Steam Cycle for Advanced Combined Cycle Technology. [Online] Siemens AG. [Citace: 25. 10 2013.] <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/energy-topics/technical-papers/Enhanced%20WaterSteam%20Cycle%20for%20Advanced%20Combined%20Cycle%20Technology.pdf>.

5. **Sandvik.** Sanicro 25. [Online] [Citace: 25. 10 2013.] <http://www.smt.sandvik.com/en/products/tube-pipe-fittings-and-flanges/high-performance-materials/high-temperature-stainless-steels/sanicro-25/>.

6. **Salzgitter Mannesmann Stainless Tubes.** Datasheet DMV 617 mod. [Online] [Citace: 22. 10 2013.] http://www.smst-tubes.com/fileadmin/media/pdf_datasheets/2010_Datasheet_DMV_617_mod_.pdf.

7. **ABSON, J. D., ROTHWELL, S. J. a CANE, J. B.** Advances in welded creep resistant 9-12 % Cr steels. [Online] [Citace: 28. 10 2013.] <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/advances-in-welded-creep-resistant-9-12cr-steels-october-2007/>.

8. **HASHIMOTO, T., a další, a další.** Latest Technology of Highly Efficient Coal-fired Thermal Power Plants and Future Prospect. [Online] [Citace: 26. 10 2013.] <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e451/e451011.pdf>.
9. **VODÁREK, V.** *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12) %Cr oceli.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0329-1.
10. **BENDICK, W., von Hagen, I.** *Creep Resistant Ferritic Steels For Power Plants.* [Online] [Citace: 12. 02 2012.] http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science_techno/table_content/sub_4/images/pdfs/040.pdf.
11. **ENNIS, P.J. a CZYRSKA-FILEMONOWICZ, A.** Recent Advances in Creep Resistant Steels for Power Plant Applications. [Online] [Citace: 12. 02 2014.] <http://www.ommi.co.uk/PDF/Articles/32.pdf>.
12. **PALIČKA, O.** *Rozbor svařitelnosti oceli P91.* Ostrava : VŠB TU Ostrava, 2009. str. 42.
13. **T-PUT - Böhler Schweisstechnik Deutschland GmbH.** *Welding filler metals for power plant engineering.* [Online] [Citace: 15. 02 2012.] http://www.t-put.com/EN_Power_01_2011.pdf.
14. **Salzgitter Mannesmann Forschung.** T23, T24 and VM 12 - Structure, Properties, Application. [Online] [Citace: 11. 02 2014.] http://www.vgb.org/en/event_mqa_pres-dfid-23699.html.
15. **HEUSER, H. a KWAN-GYU, T.** New Steels Fulfil Requirements for New High Efficient Power Plants - Welding of T24, P92 and VM12-SHC. [Online] Böhler Schweisstechnik Deutschland GmbH. [Citace: 12. 02 2014.] <http://pennwell.websds.net/2013/vienna/pge/papers/T4S5O2-paper.pdf>.
16. **ČSN EN 10216-2+A2.** *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení - Technické dodací podmínky - Část 2: Trubky s nelegovanými a legovanými oceli se zaručenými vlastnostmi při zvýšených teplotách.* 2008.
17. **GREGOROVÁ, S., BAŽAN, J. a MARTÍNEK, L.** *Sekundární metalurgie a její vliv na čistotu legovaných ocelí* 19. 2003. Celostátní konference, Teorie a práce výroby a zpracování oceli.

18. **MOHYLA, P.** *Vliv delta feritu na mechanické a žárovevné vlastnosti oceli P92*. Ostrava : PROMATTEN, 2009.
19. **HRIVŇÁK, I.** *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava : Slovenská Akadémie Ved, 1989. ISBN 80-224-0016-5.
20. **HILKES, J. a GROSS, V.** Welding CrMo steels for power generation and petrochemical applications - past, present and future. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. [Online] [Citace: 25. 04 2014.] http://bulletin.is.gliwice.pl/PDF/2013/02/02_Hilkes_Gross_Welding_of_CrMo_steels_for_power_generation_and_petrochemical_applications.pdf.
21. **KOUKAL, J., SCHWARZ, D. a HAJDÍK, J.** *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
22. **KOUKAL, J. a ZMYDLENÝ, T.** *Svařování I*. Ostrava : VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2009. str. 136 s. ISBN 978-80-148-0870-3.
23. **Kolektiv autorů.** *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava : ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
24. **Svarbazar.** Svařování metodou 111 - obalenou elektrodou. [Online] [Citace: 15. 01 2014.] <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2007010801>.
25. **Toolscomp.** Pohled do technologie svařování - MMA. [Online] [Citace: 16. 01 2014.] <http://www.toolscomp.cz/technologie/pohled-do-technologie-svarovani-mma/>.
26. **BARTOŠ, J.** *Základní kurz svařování metodou 111*. Ostrava : ZEROSS, 2008. str. 196 s. ISBN 80-86698-10-6.
27. **BARTÁK, J., a další, a další.** *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava : ZEROSS, 2002. ISBN 80-85771-97-7.
28. **Wikipedia.** Gas tungsten arc welding. [Online] [Citace: 16. 01 2014.] http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_tungsten_arc_welding.
29. **KOPEC, B. a kolektiv.** *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

30. **MASTELA, T.** *Studium mechanických vlastností svarových spojů oceli P92: diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012. 80 s.

31. **PETR, P.** *Vliv tepelného zpracování na vlastnosti svarového spoje oceli P92, svařeného metodou 141: diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2013. 74 s.

32. **UVÍROVÁ, L.** *Optimalizace technologie svařování oceli P92: diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2009. 54 s.

Seznam použitých obrázků

Obr. 1. Vývoj účinnosti elektráren Siemens v kombinovaném cyklu [1].....	11
Obr. 2. Použitelnost materiálů v závislosti na teplotě a tlaku [2].....	12
Obr. 3. Porovnání pevnosti v creepu pro Sanicro 25 a DMV 617 [5]	13
Obr. 4. Příklad použití materiálů v kotli pro různé teploty	14
Obr. 5. Rozdělení žárovevých materiálů podle pevnosti v tečení [10]	15
Obr. 6. Vývoj 9 % chromových ocelí [11]	16
Obr. 7. Porovnání pevnosti v tečení pro oceli VM12-SHC, E911 a P91 [14]	17
Obr. 8. Mikrostruktura oceli P92 (elektr.mikroskop) po austenitizaci 2 h na 970 ° [11]	21
Obr. 9. Mikrostruktura oceli P92 (elektronový mikroskop) po austenitizaci: a) 2 h na 970 °C, b) 2 h na 1145 °C, s následným popouštěním 2 h na 775 °C [11].....	22
Obr. 10. Mikrostruktura oceli P92 po austenitizaci 2 h na 970 °C a popouštění na 775 °C [11].....	23
Obr. 11. Závislost času ochlazování na výsledné struktuře [3].....	24
Obr. 12. Závislost výsledné tvrdosti na čase ochlazování [3]	24
Obr. 13. Teplotní cyklus při svařování a při tepelném zpracování oceli P92 [20].....	25
Obr. 14. Svařování obalenou elektrodou metoda 111 [24].....	26
Obr. 15. Svařovací zdroj pro metodu 111 [25]	27
Obr. 16. Svařování metodou 141 [28]	28
Obr. 17. Sestava příslušenství pro svařování metodou 141 [28]	29
Obr. 18. Tepelné zpracování polotovaru - protokol viz. příloha	31
Obr. 19. Detail úpravy svarových hran.....	31
Obr. 20. Úprava svarových hran.....	32

Obr. 21. Dokončený svarový spoj	34
Obr. 22. Místa měření tvrdosti	38
Obr. 23. Makrostruktura vzorku 1/18 (zv. 2x)	45
Obr. 24. Makrostruktura vzorku 2/18 (zv. 2x)	45
Obr. 25. Makrostruktura vzorku 3/18 (zv. 2x)	45
Obr. 26. Makrostruktura vzorku 4/18 (zv. 2x)	45
Obr. 27. Makrostruktura vzorku 5/18 (zv. 2x)	46
Obr. 28. Mikrostruktura vzorku 1/18 - svarový kov (zv.100x)	46
Obr. 29. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hran. sv. kovu a pásma přehřátí (zv.100x)	47
Obr. 30. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hran. pásma přehřátí a normaliz. (zv.100x) ...	47
Obr. 31. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hranice pásma normalizace a částečné překrystalizace (zv.100x)	47
Obr. 32. Mikrostruktura vzorku 1/18 – hranice pásma část. překrystalizace a ZM (zv.100x)	47
Obr. 33. Mikrostruktura vzorku 1/18 – základní materiál (zv.100x)	47
Obr. 34. Mikrostruktura vzorku 2/18 - svarový kov (zv.100x)	48
Obr. 35. Mikrostruktura vzorku 2/18 – hranice svarového kovu a pásma přehřátí (zv.100x)	48
Obr. 36. Mikrostruktura vzorku 2/18 - pásmo normalizace (zv.100x)	48
Obr. 37. Mikrostruktura vzorku 2/18 - pásmo částečné překrystalizace (zv.100x)	49
Obr. 38. Mikrostruktura vzorku 2/18 – základní materiál (zv.100x)	49
Obr. 39. Mikrostruktura vzorku 3/18 - svarový kov (zv.100x)	49
Obr. 40. Mikrostruktura vzorku 3/18 – hranice svarového kovu a pásma přehřátí (zv.100x)	50

Obr. 41. Mikrostruktura vzorku 3/18 - pásma normalizace (zv.100x).....	50
Obr. 42. Mikrostruktura vzorku 3/18 - pásma částečné překrystalizace (zv.100x)	50
Obr. 43. Mikrostruktura vzorku 3/18 – základní materiál (zv.100x).....	50

Seznam příloh

1. Záznam o svařování 1/18
2. Záznam o svařování 2/18
3. Záznam o svařování 3/18
4. Záznam o svařování 4/18
5. Záznam o svařování 5/18
6. Chemická analýza základního materiálu
7. Atest a protokol o tepelném zpracování základního materiálu